

**Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

ХОДАКОВСЬКИЙ Микола Іванович

УДК 621.37:621.315.616:681.382.473

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОБУДОВИ
ЗАПАМ'ЯТОВУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ З ВИКОРИСТАННЯМ
НАНО- І МОЛЕКУЛЯРНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

05.27.01 – твердотільна електроніка

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук**

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в відділі сенсорних пристроїв, систем і технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова Національної академії наук України.

**Науковий
консультант:**

доктор технічних наук, професор
Вербицький Володимир Григорович,
Національний технічний університет України
«КПІ імені Ігоря Сікорського»,
професор кафедри мікроелектроніки.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Готра Зенон Юрійович,
Національний університет «Львівська політехніка»,
завідувач кафедри електронних приладів,

доктор технічних наук, професор
Політанський Леонід Францович,
Чернівецький національний
університет імені Юрія Федьковича,
завідувач кафедри радіотехніки та
інформаційної безпеки,

доктор фізико-математичних наук, професор
Євтух Анатолій Антонович,
Інститут фізики напівпровідників
імені В.Є. Лашкарьова НАН України, завідувач
лабораторії фізики адсорбційних та
поверхневих ефектів в напівпровідникових
і тонких плівках.

Захист відбудеться «__»_____» 2019 р. о 14 год. 30 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.08 в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37, корпус № 12, аудиторія 412-12.

З дисертацією можна ознайомитися в науково-технічній бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, Київ, проспект Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «__» серпня 2019 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.Г. Артюхов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Елементна база сучасних та перспективних запам'ятовуючих пристроїв та процесорів повинна мати розміри порядку нанометрів, а це спонукає активно розробляти відповідні напрямки нанотехнологій. Як виявилось, саме в наномасштабних проявах нових фізичних та технологічних досліджень проявляються властивості матеріалів, що дозволяють реалізувати нові підходи до створення запам'ятовуючих та процесорних пристроїв.

Запам'ятовуючі пристрої та мікропроцесори нині швидко наближаються до технологічних меж своєї продуктивності. Тому в останні роки йде активний пошук нових напрямків розробок запам'ятовуючих пристроїв та мікропроцесорної техніки, відмінних від домінуючих сьогодні КМОН-технологій. Нова елементна база для вказаних пристроїв повинна мати розміри порядку нанометрів, і, відповідно, рішення для їх створення лежать в області нанотехнологій.

Конкурентоспроможність технології виробництва мікро- і наноструктур інтегральних мікросхем визначається, зокрема, мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і точністю їх взаємного розташування. В цьому плані ключовою є технологія перетворення даних топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, в топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

Отримання нанорозмірних плівок висуває значно більш жорсткі вимоги до чистоти і структурної якості в порівнянні зі звичайними субмікронними структурами. Формування нанорозмірної плівки товщиною у кілька атомних шарів зривається при наявності домішок і сторонніх включень, а також низької структурної якості. Особливу важливість, крім вимог чистоти, для отримання нанорозмірних плівок надає можливість створення нанорозмірного зображення на поверхні нанорозмірної плівки. Якщо для мікроелектроніки отримання таких зображень забезпечувалося шляхом створення необхідного рисунка на поверхні плівки з наступним фіксуванням його елементів за допомогою видалення непотрібного матеріалу, то для нанотехнології доступним методом є формування плівок, що складаються з прецизійно-локалізованих груп атомів, що може бути забезпечене за допомогою тунельно-зондових технологій.

Однак використання тунельно-зондових методів як методів індивідуальної обробки може бути виправдано лише в сполученні з методами електронної чи іонної літографії. Одні лише тунельно-зондові методи індивідуальної обробки технологічно не сумісні для обробки площ – 1 мкм^2 і менше, оскільки для висадження на таку площу необхідних атомів зі швидкістю 10^2 ат/с необхідно забезпечити час роботи тунельно-зондового літографа до 100 годин при збереженні відтворених результатів. Навпаки, перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно.

Як вказувалось вище, в наномасштабі проявляються властивості матеріалів, що дозволяють реалізувати нові підходи до створення запам'ятовуючих та процесорних пристроїв. Одним з таких підходів є розробка мемристорних технологій, зокрема запам'ятовуючих пристроїв на основі кросбарів.

Необхідність побудови запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації, а саме, на основі мемристорних наноелектронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом (RRAM) дозволить значно підвищити швидкодію і знизити споживану потужність обчислювальних пристроїв, які використовують даний вид пам'яті.

Широко відомі роботи з проблем розробки: загальної теорії та питань практичного створення нано- і молекулярних технологій для створення комп'ютерних засобів та систем – І.Д. Войтовича, В.І. Осінського, В.П. Деркача, В.Г. Вербицького, Ю.С. Яковлева, В.К. Неволіна, К.К. Лихарева, Ч. Пула, Ф. Оуенса, Н.С. Печуркіна, М. Ейгена, В.А. Ратнера, Н.А. Колчанова; методів та засобів побудови запам'ятовуючих пристроїв на основі біокомп'ютингу та імунокомп'ютингу – В.М. Глушкова, Д. Хокінса, В.М. Ахутіна, Л.І. Калакутського, А.П. Немирко, І.А. Кореневського, Є.П. Попечителя, В.П. Широчина; теорії та практичних питань з дослідження молекулярної пам'яті – К.В. Анохіна, І.В. Сергієнка, А.М. Гупала, Д. Еделмана, П.К. Георгієва, І.П. Ашмаріна, А.Р. Лурії, В.А. Молчанова, А.Б. Узденського, Н.П. Бехтерєвої, Т.В. Черніговської.

Структури, що проявляють мемристорний ефект, мають малі розміри (порядку декількох нанометрів), мають низьку споживану енергію (одиниці пікоджоулів). Опір мемристора, як двухполюсника змінюється в залежності від загальної величини заряду, що проходить через елемент. Крім цього, мемристор зберігає свій стан при вимкненні живлення. Програмування наномемристора може виконуватись засобами гібридної схеми, що забезпечує його функціонування в режимах логічного елемента та запам'ятовуючого пристрою. Електричні характеристики мемристора визначаються передісторією його функціонування, що схоже на властивості синапсу біологічних нейронних систем.

Для створення запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки необхідно налагоджувати виробництво надійних компонентів молекулярних масштабів, здатних запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі. Однією з фундаментальних властивостей цих молекул повинна бути здатність разом з іншими молекулами або іонами до самозбирання в системи більш високого ступеню складності, в мультикомпонентні молекули, або супрамолекули. Детальна розробка загального підходу до створення і вивчення об'єктів, заснованих на використанні фоточутливих молекул, дозволить вирішити завдання молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв. Перспективними в цьому відношенні серед фоточутливих з'єднань є фотохромні і люмінесцентні сполуки, здатні до зворотних, індукованих світлом, структурних перетворень на основі молекулярного фотоперемикування, зокрема сполуки бактеріородопсину.

Дослідження в ряді напрямків нанотехнологій, таких як отримання нових матеріалів, нанорозмірних сенсорів, нанороботів для «адресної доставки» лікарських препаратів вимагають, у свою чергу відповідної інформаційної підтримки у вигляді наноелектронних запам'ятовуючих пристроїв. Досліджуване в роботі поняття молекулярної пам'яті розглядається не тільки як носій інформації, а як важлива ланка в системі обробки інформації, насамперед при навчанні з

використанням складних підсистем організму людини. У зв'язку з цим представлені результати по дослідженню вкладу різних ланок вказаних підсистем, що забезпечують побудову складної ієрархічної структури обробки інформації з використанням різних молекулярних носіїв пам'яті. Такими носіями є нуклеїнові кислоти ДНК і РНК, білкові і ферментні комплекси, гліальні структури, структури гіпокампу та ін.

Розробники нанотехнологічних систем можуть використовувати вказані складні процеси в біосистемах для створення нових технологій у молекулярній електроніці і нанотехнологіях. Аналіз інформаційних процесів у клітині дає нам можливість швидко знаходити нові технічні рішення, користуючись уже створеними природою рецептами і компонентами. При цьому є дуже важливим завдання створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації на основі аналізу наноелектронних і молекулярних систем нейрона і його ядерних компонентів—ДНК і РНК. Такі запам'ятовуючі пристрої здатні зберігати інформацію із щільністю до одиниць петабайтів.

Науково-прикладна проблема, яка вирішується в цій роботі, належить до теоретичних і прикладних аспектів побудови запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації, а саме, на основі мемристорних наноелектронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом та на основі запису інформації на молекулярні носії, зокрема білкові структури та структури молекулярної електроніки з використанням нуклеїнових кислот.

Враховуючи вищевикладене, актуальність дисертаційної роботи обґрунтована необхідністю розвитку та розробки перспективних запам'ятовуючих пристроїв та процесорних елементів, як от процесорів у пам'яті, тобто оперативної пам'яті з інтегрованими обчислювальними елементами, які дозволяють не тільки проектувати постійні запам'ятовуючі пристрої з надвисокою щільністю запису інформації, але і оперативні запам'ятовуючі пристрої на основі мемристорних нанотехнологій, які здатні виконувати нейроморфні обчислення шляхом перенесення роботи реальних нейронів у нейроморфні чіпи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана відповідно до плану наукових досліджень відділу сенсорних пристроїв, систем і технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України в рамках науково-дослідних тем:

– „Розробити, дослідити та впровадити методи побудови технічних засобів та інформаційних систем для медичної діагностики на основі наноелектронних та молекулярних технологій” (№ держреєстрації 0108U001240, 2008 – 2012 рр.);

– „Розробка запам'ятовуючих структур для ЕОМ на молекулярних носіях пам'яті” (дог. № 2/1249-97 від 11 вересня 1997 р., № держреєстрації 0197U000442, 1997 – 2000 рр.);

– „Розробити та впровадити наукові засади формування інтегральних нанорозмірних структур для створення кібернетичних систем розпізнавання образів” (№ держреєстрації 0103U000738, 2003 – 2007 рр.);

– „Розробка метрологічного забезпечення та дослідна експлуатація готових до впровадження інтелектуальних сенсорних приладів на основі реєстрації та аналізу

магнітних, електричних та оптичних сигналів” (№ держреєстрації 0116U002760, 2012 – 2018 рр.);

– „Розробка ефективних зондових методів формування наноелектронних структур на основі легованого кремнію” (№ держреєстрації 0110U0011348, 2010 – 2011 рр.).

У цих проектах автор був науковим керівником та відповідальним виконавцем.

Мета і задачі дослідження. *Мета дослідження* – дослідження та побудова запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі нових та вдосконаленні існуючих методів твердотільної електроніки з використанням скануючої тунельної літографії, локального анодного окислення, технологій створення мемристорних наноелектронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом та на основі запису інформації на молекулярні носії, зокрема, білкові структури та структури молекулярної електроніки з використанням нуклеїнових кислот.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити наступні задачі:

– виконати аналіз стану і тенденцій розвитку розробок побудови запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі методів твердотільної електроніки з використанням скануючої тунельної літографії та локального анодного окислення;

– створити моделі технологічних процесів та розробити технології виготовлення і тестування мемристорних наноелектронних структур для незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом;

– розробити методи створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням властивостей оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв;

– розробити методи створення запам'ятовуючих структур та пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій із застосуванням принципів обробки інформації в наноелектронних і молекулярних системах нейронів та їх ядерних компонентах – ДНК і РНК;

– розробити модель роботи молекулярної пам'яті на основі вивчення енергетичних характеристик електропровідності і магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини з використанням особливостей просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини та застосування НКВІД – магнітометра.

Об'єкт дослідження – запам'ятовуючі пристрої із надвисокою щільністю запису інформації; методи та моделі створення молекулярної пам'яті; нано- і молекулярні технології.

Предмет досліджень – методи побудови запам'ятовуючих структур та пристроїв, моделі та методики створення технологічних процесів виготовлення мемристорних наноелектронних структур, характеристики запам'ятовуючих пристроїв з використанням обробки інформації в наноелектронних системах, створених на основі тунельно-зондових технологій, характеристики запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки з

можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі, механізми роботи запам'ятовуючих пристроїв на основі вивчення властивостей нейрона та його ядерних компонентів.

Методи дослідження включають: бібліографічний аналіз науково-технічної і патентної літератури, а також інформаційних матеріалів у базах даних та в Інтернеті; методи математичної фізики, фізичної кінетики, комп'ютерних обчислень, методи статистичної обробки результатів вимірювань, визначення похибки вимірювань і ступеня відповідності розрахункових та експериментальних даних; електричні вимірювання, осцилографія; вимірювання параметрів вакуумних технологічних процесів, температури підкладок, станів молекулярних середовищ; методи матеріалознавчих досліджень, скануюча та атомно-силова мікроскопія та літографія, мікрозондовий аналіз, вимірювання механічних властивостей поверхні, товщини і оптичних властивостей покриттів; методи досліджень роботи нейронів та їх ядерних компонентів; програмні системи для проектування запам'ятовуючих наноструктур.

Теоретичні положення та висновки підтверджені результатами експериментів та досліджень з похибкою вимірювань, яка не перевищує 10 %.

Наукова новизна отриманих результатів. У дисертації отримані такі нові наукові результати:

- запропоновано тунельно-зондові технології та вдосконалено методи розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур для запам'ятовуючих пристроїв з мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і високою точністю їхнього взаємного розташування. Використання тунельно-зондових методів дозволяє перетворювати дані топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, у топологію шаблону або структурного шару на підкладці;

- запропоновано нові методи отримання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення, а саме отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомно-силового літографа та різних величин і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості, які забезпечують задану продуктивність технологічного процесу;

- запропоновано метод отримання мемристорних наноелектронних структур, опір яких змінюється при проведенні запису інформації з використанням запам'ятовуючої матриці. Вказаний метод може бути застосовано при побудові електронних синапсів для нейроморфних чіпів;

- вдосконалено метод отримання структур молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину із досягненням надвисокої щільності запису інформації. Процеси збудження молекулярної структури розділені за часом, що дозволяє повністю виключити фотохімічні процеси поза опроміненого обсягу для забезпечення обробки інформації з високою ємністю. Вказаний метод може бути застосовано в системах обробки зображень, зокрема в системах технічного зору;

- запропоновано метод створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням технології побудови оптичної молекулярної нанопамяті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молеку-

лярної інженерії фотоперемикаючих пристроїв. Запропоновані пристрої дозволяють їх застосовувати в комп'ютерних системах із високою швидкістю;

- запропонована модель роботи молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини та особливостей реєстрації просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при застосуванні НКВІД-магнітометра. Приведена модель може бути використана при діагностиці стану організму за реєстрацією відхилень від показників норми середньої дорослої людини;

- вдосконалено модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням процесів формування та обробки інформаційного сигналу при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною структурою гемоглобіну та визначені умови локальної реєстрації зміни їх оптичної густини. Вказана модель дає можливість її використання в приладах реєстрації рівня оптичної густини пептидних структур;

- запропоновано метод створення запам'ятовуючих структур з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі принципів обробки інформації у полімерних нуклеїнових кислотах в системах нейронів та їх ядерних компонентах – ДНК і РНК. Запропонований метод дозволяє будувати запам'ятовуючі пристрої з можливістю запису та збереження інформації із застосуванням пептидних структур та нуклеїнових кислот.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розвинені фізичні та математичні моделі формування наноструктур, в основу яких покладений процес формування плівок з прецизійно-локалізованих груп атомів за допомогою тунельно-зондових технологій. Запропоновано і реалізовано методику розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур для запам'ятовуючих пристроїв з високою точністю їхнього взаємного розташування. Перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість ефективно використовувати скануючий тунельний літограф.

2. Запропоновані та практично реалізовані нові методи отримання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення при різних режимах роботи атомно-силового літографа. Отримані базові елементи структур пам'яті з використанням різних вістрів атомно-силового літографа та різних величин імпульсів напруги при різній відносній вологості. Створено і реалізовано методику формування оксиду при протіканні електрохімічної реакції між зондом і поверхнею зразка у водному середовищі, яка супроводжується процесами електро- і масопереносу іонізованих атомів зразка і гідро- та оксогруп.

3. Створено і реалізовано запам'ятовуючу матрицю на основі мемристорних наноелектронних структур зі зміною опору при проведенні запису інформації. Запропоновано методику побудови запам'ятовуючої матриці із надвисокою щільністю запису інформації, низькою споживаною потужністю і високою швидкістю роботи на основі кросбарів. Реалізовано поєднання методів локального анодного окислення та методів формування мемристорних наноструктур при отриманні структур резистивної мемристорної нанопам'яті. Вказані методи можуть бути застосовані при реалізації електронних синапсів для нейроморфних чіпів.

4. Запропоновано метод отримання структур молекулярної пам'яті на основі пептидів бактеріородопсину та фітохрому із досягненням надвисокої щільності запису інформації. Створено макетний зразок із застосуванням елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину для досліджень роботи пептиду родопсину, який відповідає за обробку інформації в оці людини з метою використання в системах технічного зору.

5. Запропоновано запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації з використанням технології побудови оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ятовуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих пристроїв. Створена і реалізована методика побудови нанопам'яті з можливістю запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі.

6. Створена модель молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини та особливостей реєстрації просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при застосуванні НКВІД-магнітометра. Запропонована методика діагностики стану організму за реєстрацією відхилень від показників норми середньої дорослої людини з використанням надчутливої реєстрації магнітного поля серця людини.

7. Розвинена модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням процесів формування та обробки інформаційного сигналу при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною структурою гемоглобіну та визначені умови локальної реєстрації зміни її оптичної густини.

8. Створений запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі обробки інформації в багатошарових МДН-структурах та полімерних нуклеїнових кислотах. Запропонована методика запису та збереження інформації із застосуванням пептидних структур та нуклеїнових кислот.

9. Результати роботи впроваджені в дослідницькі проекти, які виконувались в Інституті кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України та при проведенні державної метрологічної атестації приладів із реєстрації взаємодії оптичного випромінювання з пептидними структурами.

10. Нові конструкторські і технологічні пропозиції захищені патентами України на винаходи та корисні моделі.

Використання результатів роботи підтверджене актами та листами-довідками відповідних організацій і підприємств.

Отримані результати можуть бути використані для розвитку електронної та приладобудівної промисловості України.

Особистий внесок здобувача. Внесок автора в проведення досліджень і отримання результатів, які наведені в дисертації, та їх впровадження є визначальним. Основні теоретичні положення і практичні результати дисертації розроблені і отримані автором самостійно. З робіт, опублікованих з співавторами, у дисертації використані матеріали, отримані автором особисто, або в яких автор брав безпосередню участь на етапі постановки задач, розробки методів дослідження,

виконання експериментальних досліджень, проведення розрахунків, опису, аналізу та узагальнення отриманих результатів. Зокрема (згідно списку вибраних публікацій, наведених далі), у роботах [1, 3–5, 8, 24, 32, 45, 46, 51] представлено теоретичний базис з питань вивчення механізмів та ефектів функціонування молекулярної пам'яті при аналізуванні та узагальненні досліджуваних молекулярних запам'ятовуючих структур. У публікаціях [2, 9, 10, 20, 37, 38, 40, 48] здобувачем запропоновано і досліджено можливості керування процесами формування наноструктур при створенні технологічних процесів побудови запам'ятовуючих пристроїв; у публікаціях [11, 29, 39, 41, 50] здобувач запропонував і дослідив використання тунельно-зондових технологій при створенні запам'ятовуючих наноструктур; у публікаціях [7, 17–19] здобувач запропонував моделі та способи взаємодії оптичного випромінювання з молекулярними структурами; у публікаціях [12, 15, 16] запропоновано моделі процесів запам'ятовування в нейронних мережах; у публікаціях [13, 14, 49] досліджено та проаналізовано створені моделі стану організму людини при роботі імунної пам'яті; у публікаціях [33, 34, 36] здобувач запропонував і дослідив етапи побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням явищ формування пам'яті в нейронних структурах.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідались на міжнародних та всеукраїнських наукових конференціях, у тому числі:

Міжнародному симпозіумі з питань створення перших ЕОМ „Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє” (Київ, 1998); VI науково-технічній конференції „Приладобудування 2007– стан і перспективи” (Київ, 2007); IX Російсько-українському семінарі „Нанофізика та нанoeлектроніка” (Санкт-Петербург, 2008); XVIII Міжнародній конференції „СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии” (Севастополь, 2008); II-й Науково-технічній школі-семінарі „Біологічні інформаційні технології в охороні здоров'я” (Київ, 2009); Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology (Beregove, Crimea, Ukraine, 2010); II Міжнародній науковій конференції „Наноструктурні матеріали” (Київ, 2010); щорічній науково-технічній школі-семінарі „Біологічна і медична інформатика та кібернетика” (Київ, 2010); XXXI International Scientific Conference „Electronics and Nanotechnology” (Kyiv, 2011); Mediterranean-East-Europe Meeting „Multifunctional nanomaterials” (Nano-EuroMed) (Uzhgorod, 2011); щорічній науково-технічній школі-семінарі „Біологічна і медична інформатика та кібернетика” (Київ, 2011); XXXII International scientific conference ELNANO – „Electronics and Nano-technology” (Kyiv, 2012); щорічній науково-технічній школі-семінарі „Біологічна і медична інформатика та кібернетика” (Київ, 2012); International Conference „Parallel and Distributed Computing Systems” PDCS 2013 (Kharkiv, 2013); II Міжнародній науково-технічній конференції „Обчислювальний інтелект”–(OI-2013) (Черкаси, 2013); International Conference „Parallel and Distributed Computing Systems”– PDCS (Kharkiv, 2014); щорічній науково-технічній школі-семінарі „Біологічна і медична інформатика та кібернетика” (Київ, 2014); X Міжнародній науково-технічній конференції

„Метрологія та вимірювальна техніка” (Харків, 2016); Міжнародній конференції, присвяченій 60-річчю Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України (Київ, 2017).

Результати дисертаційних досліджень доповідались на наукових семінарах відділу сенсорних пристроїв, систем і технологій безконтактної діагностики Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України.

Публікації. Основні положення дисертації опубліковано в 89 наукових працях, з яких 1 монографія, 45 статей у наукових фахових виданнях, з них 5 статей, виданих у зарубіжних наукових виданнях, 13 статей у виданнях України, що включені до міжнародних наукометричних баз, а також у 20 авторських свідоцтвах і патентах України, 23 матеріалах конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел з 180 публікацій вітчизняної та зарубіжної літератури. Загальний обсяг дисертації – 345 сторінок. Основний текст викладено на 298 сторінках. Робота містить 127 ілюстрацій, 28 таблиць, 3 додатки із доповнювальними матеріалами та актами і довідками про використання результатів дисертації.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації та показано її зв'язок з науково-дослідною тематикою. Сформульовано мету, задачі дослідження та наукову новизну. Розглянуто практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про особистий внесок автора, апробацію роботи та публікації за темою дисертації.

Перший розділ присвячений аналізуванню стану досліджень, моделюванню і розробкам технологій та методів розрахунків режимів обладнання при виготовленні наноструктур. Вказані методи включають застосування методів нанолітографії, що дають можливість розробляти та виготовляти основні елементи запам'ятовуючих пристроїв, зокрема, для пристроїв наномедицини.

Перехід від тунельно-зондових методів індивідуального збирання молекулярних структур до групових за допомогою багатовістревих комплексів дає можливість використовувати скануючий тунельний літограф досить ефективно. Необхідним ключовим процесом при використанні скануючого тунельного літографа є тунельно-зондове масоперенесення, яке полягає у створенні в тунельному проміжку між голкою-зондом і підкладкою рел'єфа тлрд заданої структури. Істотного зменшення розмірів вдалося досягти в нанолітографах, у яких топологія шару формується в процесі послідовного переміщення вістря (рис.1 та 2).

При цьому вплив на підкладку здійснюється за допомогою технологічних середовищ, що формуються в деякому мікрооб'ємі поблизу вістря (або отвору нанометрового розміру). Об'єктами технологічного середовища, що впливають на підкладку, можуть бути енергетичний потік (електронів, іонів, фотонів), фізичне поле, а також їхня комбінація (в цьому випадку можливе формування нових компонентів, наприклад, агресивного газу) та ін. У ряді випадків скорочення тривалості операції досягається переміщенням інструмента тільки в ті області, у яких потрібен технологічний вплив (так зване векторне сканування). Перетворення

масиву „даних проектування” $L(x,y)$ у «вихідні» дані відхилення $L_i(x,y)$ (координат вістря 1 щодо пластини 2, встановленої на рухомому столі 3), з урахуванням особливостей технологічного процесу, здійснюється перетворювачем 4 (рис.1).

Перетворювач 5 здійснює обрахування неузгодженості між „розрахунковим” і „поточним” положеннями стола 3 і формує «прописані» значення для даних відхилень відповідно до виразу:

$$\Gamma_{\Pi} = \Gamma_{\Pi} + \Gamma_{\text{расс}}, \quad (1)$$

де Γ_{Π} , Γ_{Π} – машинні значення „прописаних” і „вихідних” координат x і y відхилення вістря; $\Gamma_{\text{расс}}$ – машинне значення неузгодженості, вимірюваної блоками 6 та 7. Цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП) 8 формують аналогові значення «прописаних» величин відхилення. Вузол сканування 9 реалізується на основі п'єзоелектричних приводів, які характеризуються нелінійністю, гістерезисом (розходженням величини ходи при прямій і зворотній напрузі) та інерційністю. Досягнення необхідної точності позиціонування вістря при наявності цих факторів також може бути досягнуто введенням відповідної корекції даних керування приводом за допомогою програмно або апаратно реалізованих засобів.

Відомі методи корекції відхилення в скануючих системах мають ряд недоліків, оскільки орієнтовані на електронне сканування та виходять із аналізу траєкторій електронів у електронно-літографічній установці.

Для експлуатації та розробки нових технологічних систем надто важливо мати вихідні моделі роботи скануючих систем та визначити загальні методи усунення перекручувань, обумовлені як лінійними й кутовими похибками фіксації пластини на рухомому столі, так і особливостями лінійних і нелінійних елементів системи сканування.

Результати розробка моделі перетворення „прописаних” даних відхилення в поточні дані відхилення з урахуванням корекції перекручувань, обумовлених неідеальністю елементів системи сканування (при відмінності характеристик блоку керування від ідеальних) наведені далі. Одним із способів вирішення є введення блоку 10 корекції даних відхилення для урахування реальних характеристик ЦАП та вузла відхилення. Ці характеристики можуть бути вимірювані за допомогою тестових пластин експериментально та записані в блок 10 з метою обчислення машинних значень величини корекції відхилення $\Delta \mathbf{r}_{\text{корр}}$ при робочому скануванні. Тоді значення відхилення \mathbf{r}_k мають бути сформовані як

$$\mathbf{r}_k = \mathbf{r}_{\Pi} + \Delta \mathbf{r}_{\text{корр}}, \quad (2)$$

де \mathbf{r}_{Π} – значення запропонованої величини відхилення.

Вузол сканування 5 забезпечує зміну координат місця впливу інструмента на оброблюваний об'єкт. При нульовому керуючому сигналі ЦАП координати області сканування визначаються напругою зсуву $U_{\text{см}}$ (рис. 2).

Відповідно з розглянутим методом корекції (згідно виразу (2)), структуру на рис. 1 можна спростити, об'єднавши блоки 4 й 5, і представити її у вигляді, як

показано на рис. 2. Як видно із рис. 2: 1 – блок формування послідовності прописаних даних відхилення $\{X_P, Y_P\}$, 2 – блок формування корегованих машинних значень відхилення $\{X_K, Y_K\}$, 3, 4 – ЦАПи керуючих напруг, що формують послідовність напруг відхилення $\{U_x, U_y\}$, 5 – вузол сканування; 6, 7 – вузли зміщень (початкових установок).

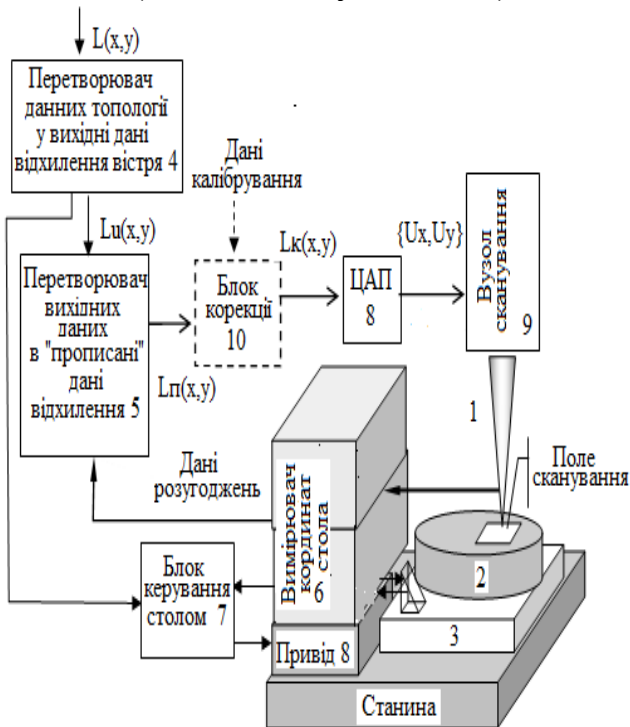


Рис. 1

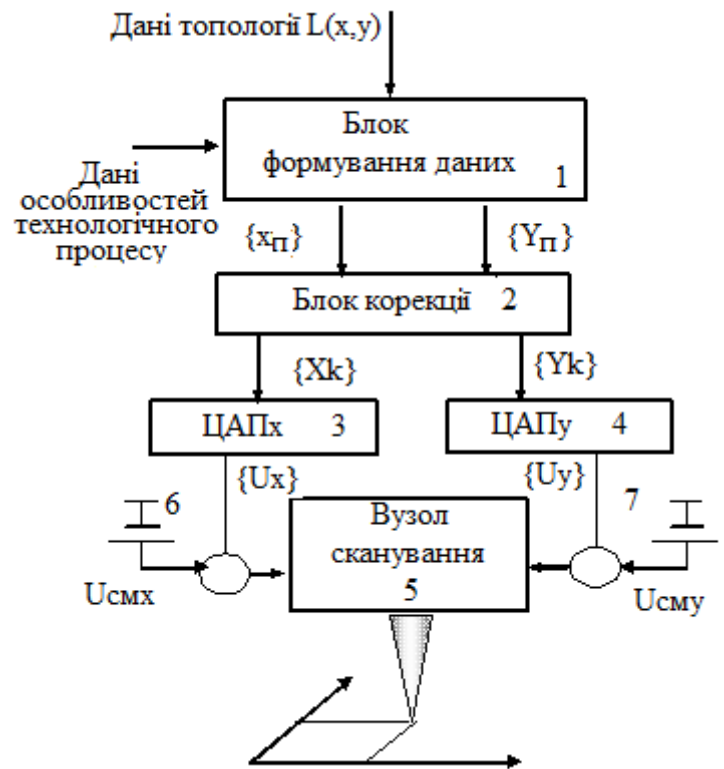


Рис. 2

У разі відсутності перекручувань у блоках 3, 4 і 5 та ідентичних характеристиках каналів відхилення, зв'язок величини дійсного відхилення $\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{x} + i\tilde{y}$ вістря та цифрового (машинного) значення $\underline{\mathbf{r}} = \underline{x} + i\underline{y}$ на вході блоку сканування може бути описаний як:

$$\tilde{\mathbf{r}} = K_{co} * \underline{\mathbf{r}}, \quad (3)$$

де K_{co} – коефіцієнт передачі системи сканування, який дорівнює

$$K_{co} = \alpha * K_s, \quad (4)$$

де α – коефіцієнт передачі ЦАП, K_s – коефіцієнт передачі вузла сканування. Для нелінійного п'єзoeлектричного перетворювача значення коефіцієнта передачі K_s залежить як від початкового стану підсистеми відхилення, так і від «прописаної» величини відхилення $\underline{\mathbf{r}}_P$.

Найпростіші характерні перекручування поля сканування при лінійних елементах вузла відхилення наведені в табл.1.

Таблиця 1. Математичні моделі характерних перекручувань у вузлі сканування, побудованого на лінійних елементах

| № | Характерні перекручування | Математична модель перекручувань |
|---|---|--|
| 1 | Зсув області сканування зображення | $\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{K} * \mathbf{r} + \Delta \mathbf{r}_{\text{см}}$, де K – дійсне число, $\Delta \mathbf{r}_{\text{см}}$ – вектор зсуву зображення |
| 2 | Поворот області сканування навколо осі координат без зміни масштабу | $\tilde{\mathbf{r}} = \tilde{K} * \mathbf{r} = K * e^{j\theta} * \mathbf{r}$, де $K = a + ib = \sqrt{a^2 + b^2} * e^{j\theta}$, причому $\sqrt{a^2 + b^2} = K$, $\theta = \arctg b/a$ |
| 3 | Зміна масштабу області сканування | $\tilde{\mathbf{r}} = \mathbf{r} + (K + \Delta K) * \mathbf{r}$, де K – дійсне число |
| 4 | Поворот навколо осі з однаковою зміною масштабу у всіх напрямках | $\mathbf{r} = \tilde{K} * \hat{\mathbf{r}} = (a + ib) * \hat{\mathbf{r}} = \sqrt{a^2 + b^2} * e^{j \arctg b/a} * \hat{\mathbf{r}}$, де $\sqrt{a^2 + b^2} = \text{const} \neq K$ |
| 5 | Різний масштаб області сканування по осях X, Y | $\tilde{\mathbf{r}} = a\mathbf{x} + i\mathbf{y}$, де $a \neq b$ – дійсні числа |
| 6 | Неортогональність осей відхилення | $\tilde{\mathbf{r}} = a\mathbf{x} + b\mathbf{y} + i(c\mathbf{x} + d\mathbf{y})$, $b \neq -c$, $ad > bc$ |
| 7 | Загальний випадок лінійних перекручувань | $\tilde{\mathbf{r}} = a\mathbf{x} + b\mathbf{y} + 1 + i(c\mathbf{x} + d\mathbf{y} + m)$, $a \neq d$, $b = -c$ |

Лінійний блок відхилення. Якщо цифроаналогові перетворювачі лінійні, тоді

$$U_{ax} = a_x * \underline{x}_k, U_{ay} = a_y * \underline{y}_k, \quad (5)$$

де a_x, a_y – коефіцієнти передачі ЦАП 3 й 4; $\underline{x}_k, \underline{y}_k$ – двійковий код на вході ЦАП.

При відомих необхідних машинних значеннях величини відхилення \underline{x} та \underline{y} (отриманих на етапі підготовки даних), у загальному випадку дійсні значення відхилення будуть дорівнювати:

$$\underline{x} = a\underline{x} + b\underline{y} + 1, \quad \underline{y} = c\underline{x} + d\underline{y} + m, \quad (6)$$

де 1 й m – погрішності юстування зсуву вістря, a, b, c, d – коефіцієнти передачі відповідних каналів відхилення, a/d – відношення масштабів у напрямках осей X и Y , b/c – характеризує неортогональність відхилення, d/y і c/a – характеризують обертання області сканування.

Знайдемо математичні залежності корекції даних для загального випадку. Необхідні машинні значення величини відхилення, які мають подаватися на вхід системи відхилення (без засобів апаратної або програмної корекції) можна отримати, підставивши в рівняння (3) $\underline{x} = \underline{x}_\Pi$ та $\underline{y} = \underline{y}_\Pi$.

Тоді

$$\underline{x}_k = 1/\Delta * (d * \underline{x}_\Pi - b * \underline{y}_\Pi - d * 1 + b * m), \quad \underline{y}_k = 1/\Delta * (-d * \underline{x}_\Pi + a * \underline{y}_\Pi - 1 * c - a * m), \quad (7)$$

де $\Delta = a \cdot d - b \cdot c$; x_{Π} , y_{Π} – «прописані» значення координат вістря, що задаються блоком 1.

Для компенсації нелінійності шляхом введення електричних зв'язків між ЦАП і функціональними перетворювачами для компенсації нелінійності були використані нелінійні ЦАП.

Таким чином, запропоновано методи підвищення рівня лінійності для систем сканування при використанні кантилевера (вістря) на основі карбиду вольфрама. Також створені технологічні етапи перетворення даних топології інтегральних наносхем, отриманих при проектуванні, у топологію структурного шару на підкладці. На відтворюваність результатів виміру параметрів отримуваної структури в тунельному літографі впливає структура вістря голчастого зонда, тому що з розміром, формою і хімічною природою вістря зв'язана роздільна здатність і структура поверхні, що обробляється.

У процесі формування мікрівістря після локального оплавлення попередньо легованої кремнієвої пластини електронним променем і наступним її остиганням в рідкій вершині вістря, що формується, виникають сили поверхневого натягу великої величини. У роботі розглянута можливість сил електричного походження переборювати сили поверхневого натягу, завдяки чому стає можливим отримання мікрівістря з радіусом скруглення при вершині порядку 10 нм і менше, аж до втрати стійкості.

Рідка фаза розплавленого легованого кремнію шляхом деформування і витягування в напрямку до анода може бути використана для створення вістря з необхідними параметрами. Розглянемо технологічні параметри в процесі проектування та виготовлення вістрів, які використані для виготовлення базових елементів нанопам'яті.

Для визначення напруженості поля E на вершині одиночного аксиально-симетричного вістря довільної форми можна скористатися емпіричною формулою:

$$E = U / (k r_k), \quad (8)$$

де U – різниця потенціалів між анодом і катодом; r_k – радіус кривизни еквіпотенційної поверхні при вершині мікрівістря; k – геометричний параметр, що задається у вигляді

$$k = 1/2 \ln(2l/r_k), \quad (9)$$

де l – висота вістря. Геометричний фактор k може бути обчислений більш точно:

$$k = 1/2 \ln\{4dl/[r_k(2d+l)]\}, \quad (10)$$

де d – відстань від вершини вістря до площини анода. При $l \ll d$ вираз (10) переходить у (9).

Представлено методи експериментальних досліджень і обробка їх результатів.

Другий розділ дисертації присв'ячений розв'язанню проблем по створенню елементів запам'ятовуючих структур з використанням локального анодного окислення (ЛАО) з високою продуктивністю і відповідною кінетикою процесів при розробці та вдосконаленні технологічних процесів формування і контролю нанoeлементів на поверхні металів і напівпровідників на базі атомно-силового мікроскопа Solver PRO-M. До складу базової моделі літографа на базі атомно-силового мікроскопа Solver PRO-M входять: 1 – блок відведення та сканування, 2 – вимірювальна головка, 3 – система відеоспостереження, 4 – віброізолююча платформа (рис. 3). Схема процесу ЛАО показана на рис. 4.



Рис. 3

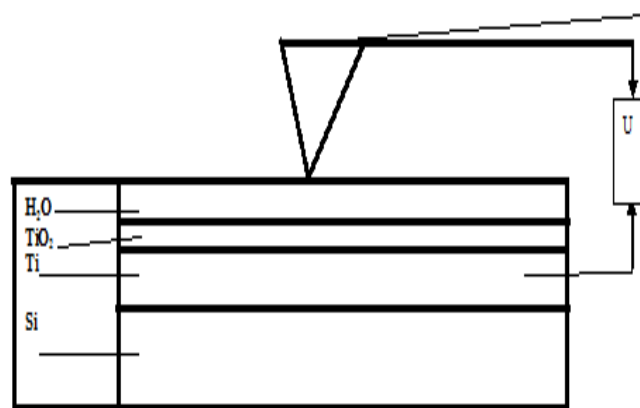


Рис. 4

Якщо подати негативну напругу на зонд, виникає електрохімічна реакція між зондом і поверхнею зразка у водному середовищі, яка супроводжується процесами електро- і масопереносу іонізованих атомів зразка і гідро- та оксогруп. В результаті під вістрям зонда починає рости оксидний шар.

Розглянуті методи літографії на основі ЛАО, при яких змінюється не тільки рельєф зразка, а й локальні електрофізичні властивості його поверхні. Для отримання нових методів ЛАО необхідно було вирішити – визначення кінетики ЛАО, виявлення чинників, що визначають його продуктивність, а саме: властивості окислюваного матеріалу, його питомий опір, наявність на поверхні природної оксидної плівки і її товщину, співвідношення питомих щільностей металу і оксиду, електрохімічну константу процесу окислення.

Розглянемо приклади для кремнієвого зонду та плівки металу. В режимі анодного окислення на зонд подається від'ємне зміщення напруги відносно підкладки. Волога із навколишнього середовища служить електролітом. Внаслідок капілярного ефекту та сильного електричного поля вода конденсується на кінчику зонду і обволікає його (рис. 5). Одним із шляхів зменшення ширини ліній, які формуються при окисненні є збільшення відстані між зондом та підкладкою, де молекули води дисоціюють на йони водню та OH^- групи. При цьому молекули води знаходяться в рівновазі з продуктами дисоціації H^+ і OH^- . Електричне поле розділяє ці йони, направляючи OH^- групи до підкладки.

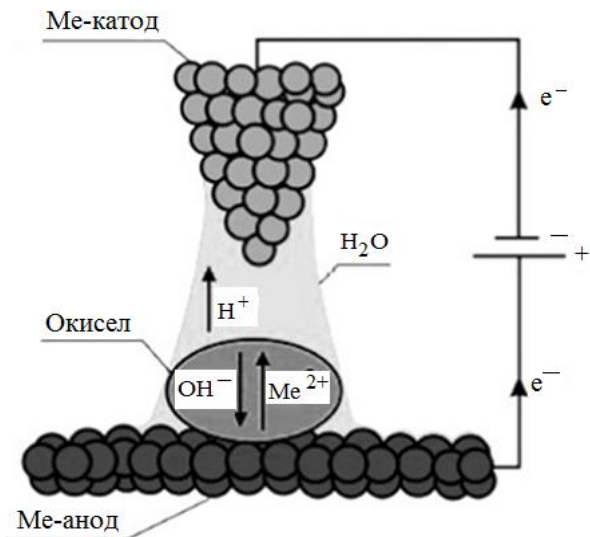


Рис. 5

Суть методу ЛАО в протіканні електрохімічної реакції з електро- та масопереносом йонізованих атомів підкладки та гідроксильних груп з утворенням оксидів та водню під провідним зондом на поверхні підкладки при прикладенні негативного зсуву напруги відносно зонду (рис. 5). Процес ЛАО відбувається за допомогою АСМ- зонду та структури надтонкої плівки титану на поверхні кремнію із присутністю водяного шару в зоні вістря. Величина роздільної здатності ЛАО легованого кремнію залежить від величини напруги та оксидних областей.

Формування оксидної структури відбувається за моделлю Кабрера і Мотта. Виходячи із такої моделі ЛАО спостерігається два струми – іонний та електронний. При рості оксиду його товщина переважає критичне значення і струм йонів є більшим, ніж кількість електронів тунелювання. Електронний струм починає керувати окисленням за моделлю Кабрера і Мотта:

$$x = x_{\infty} \{1 - \exp[-(t - t_p) / \tau]\}, \quad (11)$$

де x_{∞} , t_p і τ – кінцева товщина шару оксиду в стаціонарному стані, час пасивації (проводиться електрохімічно: йони металу, що захищаються під дією струму переходять в розчин з йонами, які здатні створювати дуже малорозчинні сполуки) і постійна часу процесу анодизації. При цьому товщину оксиду можна визначити за допомогою виразу:

$$h = h_c \ln (t/t_c), \quad (12)$$

де $h_c = - \hbar (8m\chi_0)^{0.5}$ – критична товщина, при якій зростанням висоти оксиду починає керувати електричний струм; \hbar – постійна Планка; m – маса електрона; χ_0 – енергетичний бар'єр на границі метал-оксид металу; t_c – час зміни типу переважаючого струму.

Система для ЛАО складається з 3-х контурів захисту: а) віброзвукового, б) від електромагнітних завад, в) забезпечення рівня вологості (рис. 6). Блок інформації має вихід на п'єзодрайвер і п'єзосканери. Контроль за вологістю здійснюється за допомогою лазерів. Є система подачі додаткового узгодженого потенціалу і петля зворотнього зв'язку від датчика вологості.

Приведені результати експериментів з отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомносилового літографа. Смужки анодного окислу, створені під алмазоподібним зондом є більш стабільними при напрузі 8 В. Серед смужок анодного окислу, створених під кремнієвим зондом також спостерігається збільшення стабільності смужок при збільшенні напруги до 8 В.

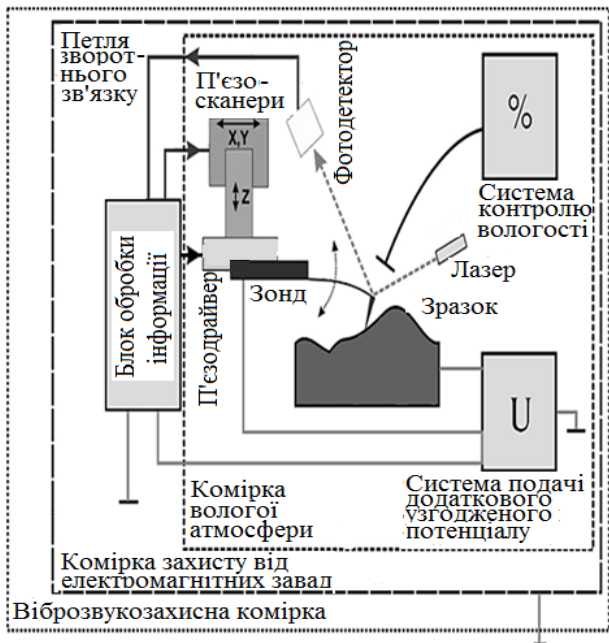


Рис. 6

Одним з напрямків зниження шкідливого впливу неоднорідних електричних напруг є відпрацювання режимів анодного окислення при мінімально можливих значеннях електричних напруг. Обмеженням на зменшення значень напруг є необхідність окислення поверхні. Однак, ситуація тут досить сприятлива, оскільки немає необхідності в створенні товстих шарів оксиду.

Результати експериментів з кремнієвими та вольфрамовими вістрями з радіусом закруглення при вершині 15 нм при роботі на АСЛ показані на рис. 7. Залежність ширини доріжки від величини струму для кремнієвого вістря показана на рис. 8.

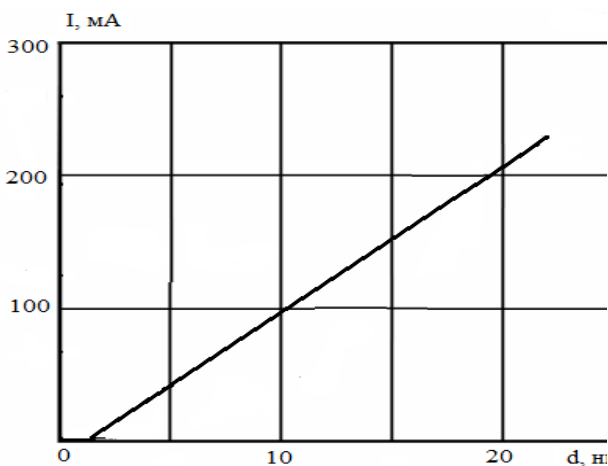


Рис. 7

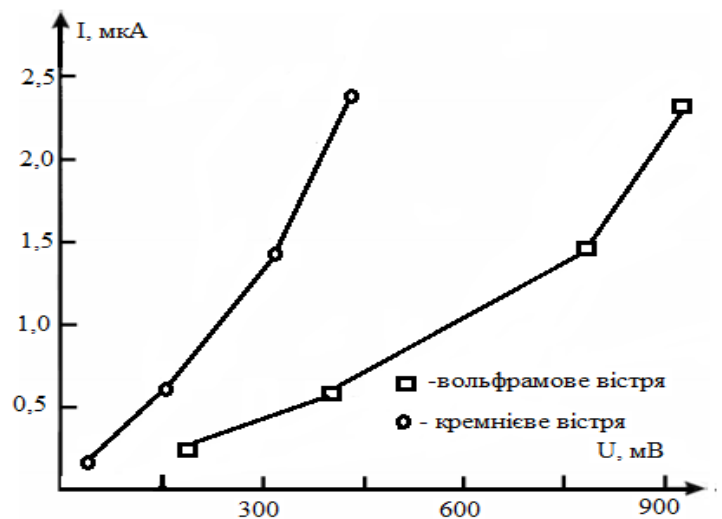


Рис. 8

Із рис. 8 видно, що ширина доріжки збільшується при збільшенні струму між вістрями та підкладкою. Вольт-амперні залежності при отриманні контактних крапок між вольфрамовим та кремнієвим вістрями і платиновою підкладками показали збільшення напруги в 3 рази для вольфрамового вістря.

На рис. 9 та 10 показані структури зі смужками анодного окислу, створених під різними атомносиловими (АС) зондами.

Приведена залежність висоти утвореного оксидного горбка від тривалості імпульсу напруги 12 В при товщині титанової плівки 15 нм (рис. 11). Спостерігається збільшення висоти оксидного горбка при збільшенні тривалості імпульсу напруги. Висота оксидного горбка при прикладеній до зонду імпульсної напруги тривалістю 25 мс з товщиною титанової плівки 15 нм збільшується при збільшенні вказаної напруги (рис. 12).

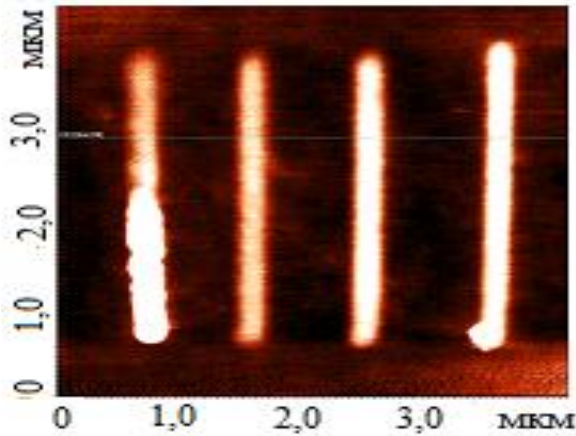


Рис. 9

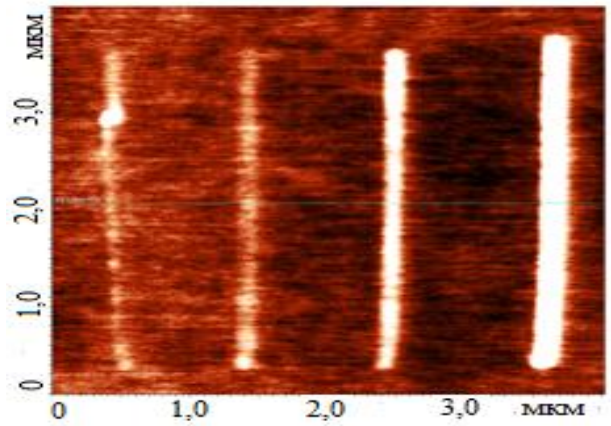


Рис.10

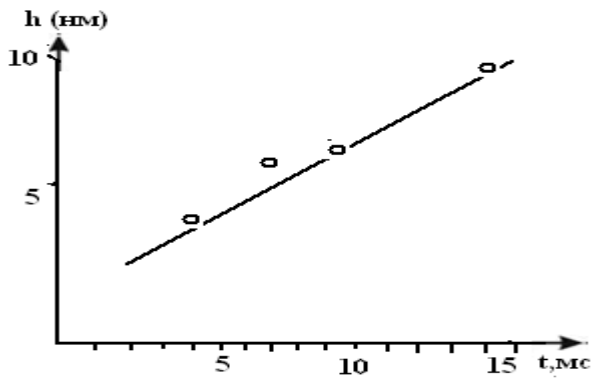


Рис. 11

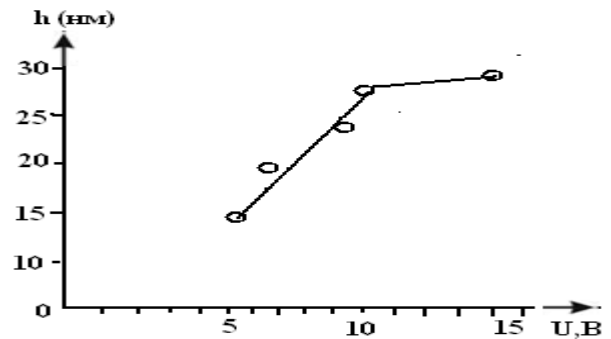


Рис. 12

Отримані залежності ширини окисних смужок від величини та тривалості імпульсів напруги (рис. 13). Для досягнення високої роздільної здатності і необхідної ширини окислених ділянок поверхня має бути мінімальна. Спостерігалось збільшення ширини окисних смужок при збільшенні тривалості імпульсів напруги 10 В. Збереження вказаної тенденції, тобто збільшення ширини окисних смужок від величини імпульсів напруги тривалістю 3 мс показана на рис. 14.

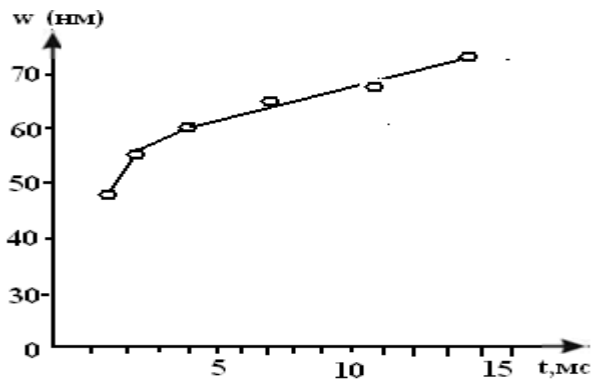


Рис. 13

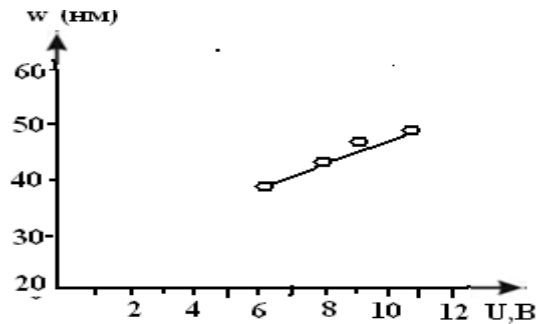


Рис. 14

Таким чином тривалість імпульсів напруги при отриманні необхідної ширини окисних смужок є важливим чинником.

Були визначені режими анодного окислення на кремнії під зондом атомно-силового мікроскопа, а також вимоги до проведення АСЛ експерименту, що забезпечують отримання окислених ділянок поверхні з шириною на рівні 0,1 мкм при товщині оксиду менше 1 нм. Розроблено метод, де в процесі росту оксидних нанорозмірних структур бере участь окислювач у вигляді адсорбованої на поверхні підкладки води.

Досліджувалась залежність висоти оксидних нанорозмірних структур легованого кремнію від прикладеної напруги і при різній відносній вологості в зоні роботи зонду (рис. 15 та 16). Висота оксидних нанорозмірних структур легованого кремнію збільшується від прикладеної напруги при підвищенні відносної вологості до 90 %.

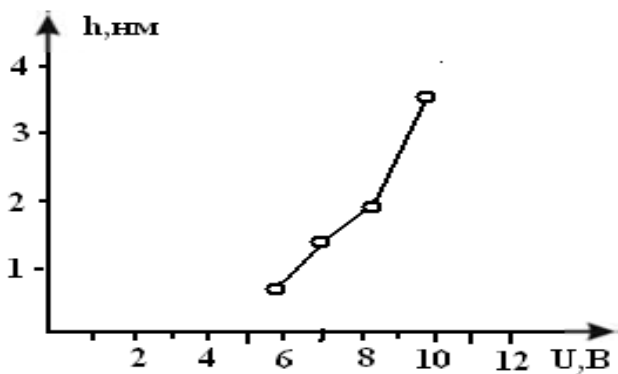


Рис. 15

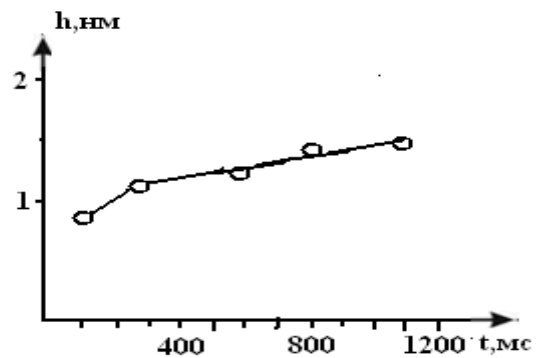


Рис. 16

Для вирішення питань збільшення продуктивності процесів ЛАО на межі розділу оксид-підкладка використовувалась залежність швидкості росту оксиду від щільності та молекулярної ваги оксиду металу і щільності потоку іонів кисню:

$$v = \mu_0 J / p_0, \quad (13)$$

де v – швидкість росту оксиду, $p_0 \mu_0$ – щільність та молекулярна вага оксиду металу, J – щільність потоку іонів кисню у зоні зонд-підкладка. В технологічних процесах створення наноструктур застосовувались кремнієві підкладки, леговані титаном. При ширині отриманих смужок 30 нм, висотою від 1 до 5 нм в залежності від матеріалу кантилевера кращі результати були у кантилеверів з покриттям карбідом вольфрама. За вказаними дослідженнями отримано 7 патентів України на винахід.

В даному розділі вперше запропоновано нові методи отримання наноструктур запам'ятовуючих пристроїв на основі ЛАО, а саме отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомносилового літографа та режимів величини і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості, які забезпечують значну продуктивність ЛАО.

У третьому розділі наведені результати використання мемристорних нанотехнологій для виготовлення перспективних елементів резистивної пам'яті (ReRAM). Для вирішення проблем створення елементів запам'ятовуючих структур з використанням нанoeлектронних мемристорних структур для нейроморфних чіпів були запропоновані моделі та проведені експерименти з розробки запам'ятовуючих елементів та запам'ятовуючих матриць на основі кросбар-архітектури.

Як вказувалось вище, в наномасштабі проявляються властивості матеріалів, що дозволяють реалізувати нові підходи до створення запам'ятовуючих пристроїв. Модель роботи мемристорної структури з тонким шаром напівпровідникового

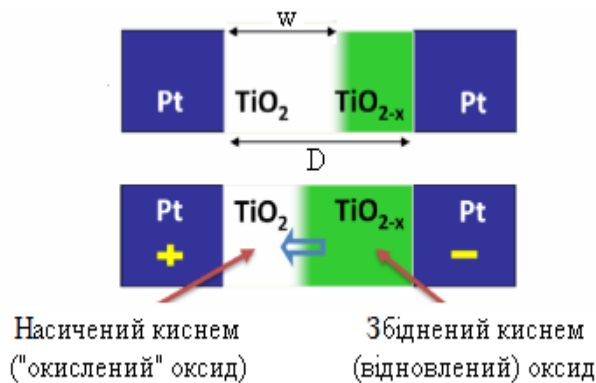


Рис. 17

матеріалу, розміщеного між двома металевими контактами з використанням еквівалентної схеми показана на рис. 17. Процес окислення/відновлення в оксиді титану (товщина 50 нм) веде до різкої зміни провідності МДМ-структури.

Процес виготовлення мемристорної структури включає підготовку підкладки, напilenня металевих шарів, анодне осадження діелектричного шару. Під час початкового прикладення напруги при процесі формування структури діелектрик розділяється на 2 шари з генерацією O_2^- аніонів та кисневих вакансій V_O^{++} . Позитивно заряджені кисневі

вакансії дрейфують до негативно зарядженого електроду, відновлюючи шар TiO_2 до TiO_{2-x} , змінюючи значення його опору шляхом зменшення в 1000 разів і більше. В такій схемі опір пристрою можна уявити як суму опорів двох змінних резисторів, з'єднаних послідовно. Один з резисторів (легована область) має низький опір R_{on} , інший – набагато більш високий опір R_{off} .

Поведінка мемристора відповідно переходу від стану з низькою (логічна 1) до стану з високою провідністю (логічний 0) і назад дозволяє використовувати його як запам'ятовуючий елемент: при подачі напруги протилежної полярності мемристор замикає або розмикає ланцюг, який створюється з допомогою останнього.

Побудова запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації, а саме, на основі мемристорних нанoeлектронних структур у складі елементів надвеликих інтегральних схем незалежної резистивної пам'яті з довільним доступом дозволяє значно підвищити швидкодію і знизити споживану потужність обчислювальних пристроїв, які використовують даний вид пам'яті.

В поєднанні методів локального анодного окислення та методів формування мемристорних наноструктур можна отримувати структури резистивної мемристорної нанопам'яті.

Резистивна пам'ять довільного доступу відрізняється зберіганням даних в осередках за рахунок зміни опору матеріалу, а не електричного заряду. Мова йдеться про створення альтернативної незалежної пам'яті, що має високу щільність запису даних, низьку споживану потужність і високу швидкість роботи.

В запропонованій математичній моделі мемристивності до металевих контактів прикладається напруга, заряджені іони починають дрейфувати, і границя між двома областями зміщується. Залежність між струмом і напругою визначається виразом:

$$v(t) = R_{on} \{(w(t))/D\} + R_{off} \{1 - \{(w(t))/D\}\} it. \quad (14)$$

При цьому границя зміщується за законом:

$$(dw(t))/dt = \mu_v (R_{on}/D) i(t), \quad (15)$$

де μ_v – середня рухливість іонів, D – товщина шару, w – ширина легованої зони.

Інтегрування (15) дає формулу для w :

$$w(t) = \mu_v (R_{on}/D) q(t), \quad (16)$$

Підставляючи (16) в (14) та враховуючи, що $R_{ON} \ll R_{OFF}$, отримуємо вираз для мемристивності:

$$M(q) = R_{off} \{1 - ((\mu_v R_{on})/D^2)\} q(t). \quad (17)$$

З виразу (17) випливають два важливі висновки. По-перше, як і передбачалося в моделі, опір мемристора є функцією заряду q , тобто залежить від сумарного заряду, що пройшов через мемристор. По-друге, мемристивність різко збільшується зі зменшенням D . Для будь-якого матеріалу в наномасштабі значення доданка, що містить D , на порядки вище, ніж в мікромасштабах. Таким чином, мемристивність стає досить важливою для розуміння характеристик розглянутого типу електронних пристроїв у міру того, як їх розміри зменшуються до манометрових масштабів. Реалізація запам'ятовуючої матриці на основі нанoeлектронних мемристорних структур показана на рис. 18. Така матриця виконана на основі 3D-кросбарної архітектури, а саме, із взаємно перпендикулярних металевих нанодротів, розділених оксидними шарами. Між шарами нанодротів-шар оксиду титану (можна гафнію або кремнію) із розміром 50 нм. При прикладанні до цього шару надпорогової напруги, в останньому підвищується опір від 100 до 1000 разів. При цьому відкривається мемристор з розривом зв'язку в ланцюгу (стан логічного 0). Після перемикавання при невеликому допороговому опорі мемристор закрива-

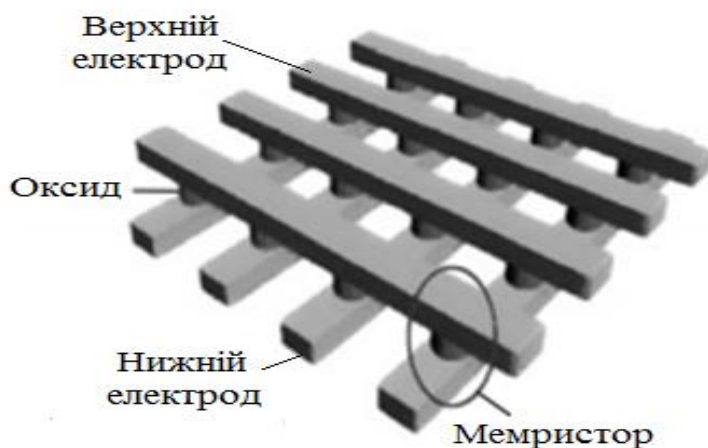


Рис.18

ється з появою струму в ланцюгу (логічна 1).

архітектури, а саме, із взаємно перпендикулярних металевих нанодротів, розділених оксидними шарами. Між шарами нанодротів-шар оксиду титану (можна гафнію або кремнію) із розміром 50 нм. При прикладанні до цього шару надпорогової напруги, в останньому підвищується опір від 100 до 1000 разів. При цьому відкривається мемристор з розривом зв'язку в ланцюгу (стан логічного 0). Після перемикавання при невеликому допороговому опорі мемристор закрива-

На основі наномемристорних структур можна розробляти пристрої, які в своєму складі мають електронний синапс (рис. 19 та рис. 20). На основі тонких плівок TiO_x в сендвіч структурі між двома платиновими контактами створюється провідний канал із вакансій кисню, який може виконувати функції синапсів – тобто точок контакту між нервовими клітинами у живих організмів. Такий пристрій здатний виконувати резистивне перемикавання структури в залежності від прикладеної напруги. Під дією імпульсів напруги запису при запам'ятовуванні 2 В підвищується опір до від 100 до 1000 разів. На рис. 20 електронний синапс представлений МДМ-конденсатором розміром 10 нм із зворотним резистивним перемиканням. Енергія споживання – 5 пДж. Інтегрується в матричну 3D- кросбарну архітектуру.

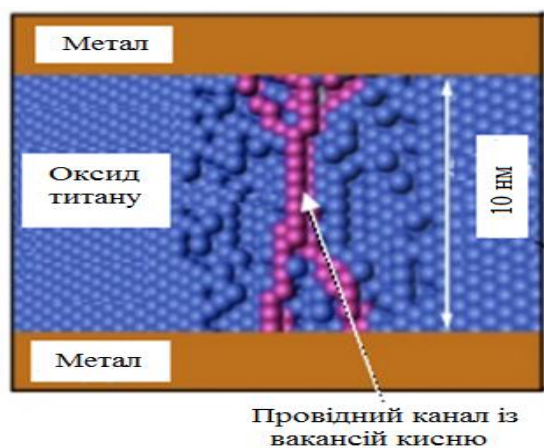


Рис. 19

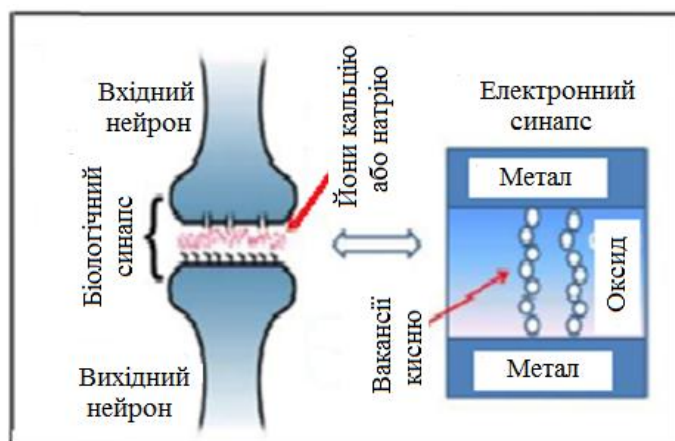


Рис. 20

Для досліджень мемристор виготовлявся з відпаленого TiO_2 . Відпал являє собою процес різкого нагрівання матеріалу для зміни аморфного стану до кристалічного, що необхідно для створення кисневих вакансій, які мають основоположне значення для функціонування мемристора. Товщину і дефектність оксидного шару визначають відношенням між електричними опорами структури в низько- (R_{LRS}) і високоомному (R_{HRS}) станах, а значить і її завадостійкість. У свою чергу, матеріал і розмір верхнього електрода також впливають на прояв властивостей резистивного перемикавання. Стан мемристора "запам'ятовується" і може зберігатись практично необмежено довго, і для цього йому не потрібно джерело напруги. Досягнутий в експериментах час перемикавання мемристора з одного стану в інший складав 10 нс.

Аналогію роботи масиву мемристорів з нейроном можна пояснити так: швидкість передачі сигналу залежить від часу активації нейронів, чим менше часовий проміжок між активаціями, тим швидше передається сигнал по синапсу. Так само працює і масив мемристорів: при подачі струму з інтервалами 20 мс опір мемристора вдвічі менше, ніж при інтервалах 40 мс. При високому опорі і розриву ланцюга струм приймає від'ємне значення (логічна 1). При низькому опорі ланцюг відновлюється і отримуємо позитивне значення струму (логічний 0). Час перемикавання до 1 нс. Вказані стани мемристор запам'ятовує і може зберігати

необмежено довго без джерела напруги.

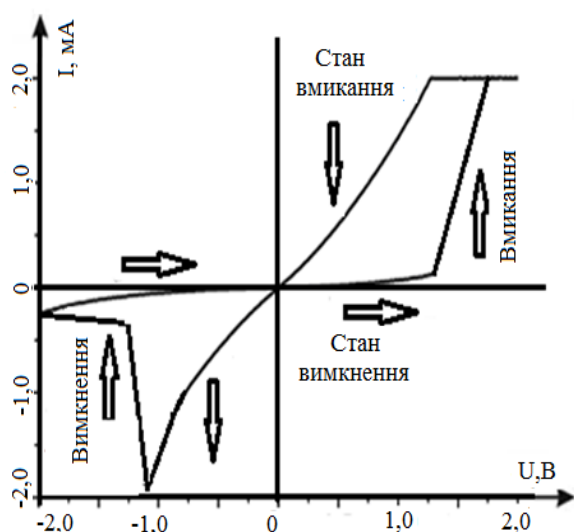


Рис. 21

Вольт-амперна залежність роботи мемристорної пам'яті показана на рис. 21. Як видно із рисунка в діапазоні напруг від 0,5 В відбувається зчитування інформації. Запис даних в комірку пам'яті проводиться при напрузі 1,5 – 2 В.

Основу нейроморфних систем складають мемристори як двополосні пристрої, електричний опір яких змінюється від пройденого через нього заряду. Електричні характеристики мемристора визначаються передісторією його функціонування, що схоже на властивості синапсу природних нейронних систем. Ключові фактори: висока нейронів, що дозволяє розпаралелити виконання операцій і адаптованість ваг синапсів, яка лежить в основі функціонування і здат-

ності до навчання біологічних і штучних нейронних систем. В кінцевому підсумку, застосування мемристорів як синапсів нейроморфних систем дозволяє підвищити обчислювальну ефективність подібних систем завдяки збільшенню щільності логічних елементів і зв'язності системи.

У четвертому розділі приведені результати дослідження та створення зразків молекулярної пам'яті на основі пептидів та фарбників. Розробка та дослідження елементів молекулярної пам'яті на основі пептиду бактеріородопсину (БР) має важливе значення як прототип пептиду ока людини родопсину, який відповідає за обробку зорової інформації.

Важливим підходом для розробки елементів молекулярної пам'яті є використання розгалуженого фотоциклу пептиду БР. Оскільки поглинаюча здатність стану О всередині активованого обсягу БР більш ніж у 1000 разів від решти елементів обсягу, для створення великого диференціального сигналу можна використовувати навіть слабе джерело випромінювання (рис. 22). Перший лазерний імпульс ініціює перехід з основного стану В у стан І, з якого настає теплова релаксація в стан О. Далі можливі два варіанти: або система повертається в початковий стан В, або під дією другого лазерного імпульсу переходить у стан Р, який повільно релаксує в стан Q, з якого, в свою чергу, можливий перехід в основний стан В. БР був обраний тому, що фотоцикл (послідовність структурних змін, які молекула зазнає при реакції зі світлом) робить цю молекулу ідеальним логічним запам'ятовуючим елементом типу «&» (логічне «і») або типу перемикача з одного стану в інший (тригер). Як показали дослідження, В-стан (логічне значення «0») і Q-стан (логічне значення «1») є проміжними станами молекули і можуть залишатися стабільними протягом багатьох років. Іншою важливою особливістю БР є те, що два стани мають спектри поглинання, які помітно відрізняються. Це дозволяє легко визначити поточний стан молекули за допомогою лазера, налаштованого на відповідну частоту. Дані, записані в такому пристрої, можуть зберігатися приблизно п'ять років. Був побудований

прототип системи пам'яті, в якому БР запам'ятовує дані в тривимірній матриці (рис. 23).

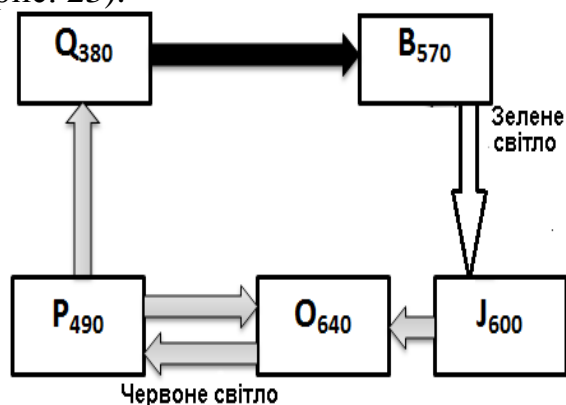


Рис. 22

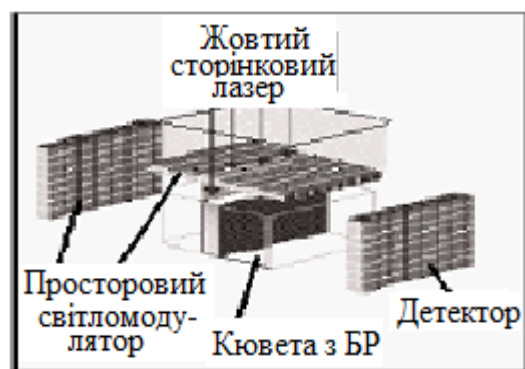


Рис. 23

Первинним процесом в операціях, як читання, так і запису є вибір тонкого пептидного сегменту в обсязі носія і його активація лазерним імпульсом. Матрицею є кювета (20x20x40 мм), заповнена поліакридним гелем, в який поміщений протеїн. Протеїн, який знаходиться в В-стані, фіксується в просторі при полімеризації гелю.



Рис. 24

Запис даних. Кювету оточує батарея лазерів і детекторна матриця, побудована на базі приладу, що використовує принцип зарядової інжекції, який служить для запису і читання даних. При запису даних для переходу молекул у Q-стан спочатку треба використовувати жовтий «сторінковий» лазер. Просторовий світловий модулятор (SLM) є LCD-матрицею, що створює маску на шляху променя, викликає виникнення активної (збудженої) площини в матеріалі усередині кювети. Ця енергоактивна площа є сторінкою даних, яка може вміщати масив розміром 4000x4000 комірок (рис. 24). Товщина сторінки залежить від оптичного пристрою і варіюється від 20 мкм в разі системи призми до 120 мкм в разі простих циліндричних лінз. Через 8 мс після пейджінга активується лазер даних і просторовий світломодулятор (SLM) для опромінення тих елементів обсягу, в які буде записана логічна "1". При запису інформації за допомогою просторового світломодулятора БР повертається в стан спокою з використанням червоного записуючого лазера, що розташовується під прямим кутом щодо жовтого. SLM також керується матрицею двійкових даних і, таким чином, створює на шляху променя відповідну маску, тому опроміненню піддаються тільки певні точки сторінки. Молекули в цих місцях перейдуть у Q-стан і будуть представляти двійкову одиницю. Частина сторінки повернеться в початковий В-стан і буде представляти нулі.

Читання даних. Для того щоб прочитати дані, треба знову використовувати сторінковий лазер, який переводить читану сторінку в Q-стан. Вказана операція

необхідна для активації сторінки БР для читання даних (рис. 25). Це робиться для того, щоб в подальшому за допомогою відмінності в спектрах поглинання ідентифікувати двійкові нулі і одиниці. Через 1,5–2 мілісекунди після цього сторінка опромінюється червоним лазером низької інтенсивності випромінювання. Низька інтенсивність потрібна для того, щоб попередити перехід молекул у Q-стан. Читання даних відбувається з використанням диференціального поглинання: світло з довжиною хвилі 600–640 нм ефективно поглинається тільки двома інтермедіатами фотоциклу світлоадаптованого БР – J і O (рис. 26).



Рис. 25

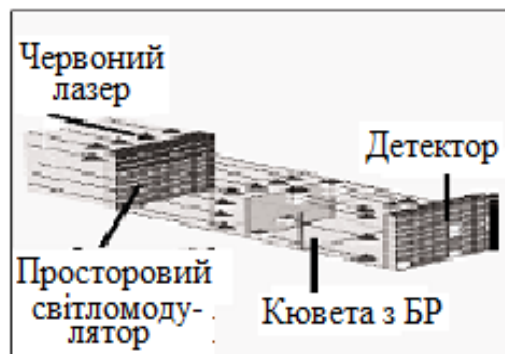


Рис. 26

Для забезпечення цілісності даних при вибіркового стиранні сторінок застосовується кешування декількох суміжних сторінок. Сторінка даних може бути прочитана без руйнування до 5500–6000 разів. Кожна сторінка відслідковується лічильником, і якщо відбувається 1000 читань, то сторінка відновлюється за допомогою нової операції запису. Дані можуть стиратися посторінково або повністю. Для повного стирання даних досить короткого імпульсу синього лазера, щоб повернути молекули БР із стану Q в початковий стан В.

Така молекулярна пам'ять має певні переваги в порівнянні з традиційною напівпровідниковою пам'яттю. По-перше, вона заснована на пептиді, що виробляється у великій кількості і за невисокою ціною, чому сприяють досягнення генної інженерії. По-друге, система може функціонувати в більш широкому діапазоні температур, ніж існуюча напівпровідникова пам'ять. По-третє, така пам'ять енергонезалежна. По-четверте, процеси збудження розділені в часі, що дозволяє повністю виключити фотохімічні процеси опроміненого обсягу, що спрощує оптичну систему і збільшує надійність. Нарешті, кювети з даними можна довго і безпечно зберігати. Хороша селективність операції читання забезпечує прийнятне співвідношення сигнал/шум навіть при товстих (1–2 см) носіях пам'яті, що містять більше 1000 сторінок. Процес читання може бути завершений протягом приблизно 5–7 мс, однак наступне читання не може бути виконане до повного завершення фотоциклу. Це збільшує час циклу читання при послідовному читанні до 10–12 мс.

Запропонована система з швидкодії близька до напівпровідникової пам'яті, поки не зустрінеться сторінковий дефект. При виявленні такого дефекту необхідно перенаправляти промінь для доступу до таких сторінок з іншого боку. Теоретично

кювета може вмістити 1 Тб даних, а обмеження на ємність пов'язані, в основному, з лінзовою системою і чистотою БР.

Розробка молекулярної пам'яті з використанням фарбників. Для створення запам'ятовуючих пристроїв з використанням молекулярної електроніки необхідно налагоджувати виробництво надійних компонентів молекулярних масштабів, здатних запам'ятовувати, відтворювати і обробляти інформацію за допомогою світла певної довжини хвилі.

Однією з фундаментальних властивостей таких молекул повинна бути здатність разом з іншими молекулами або іонами до самозбирання в системи більш високого ступеню складності, в мультикомпонентні молекули, або супрамолекули. Детальна розробка загального підходу до створення і вивчення об'єктів, заснованих на використанні фоточутливих молекул, дозволить вирішити завдання молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

Перспективними в цьому відношенні серед фоточутливих з'єднань є фотохромні і люмінесцентні сполуки, здатні до зворотних, індукованих світлом, структурних перетворень на основі молекулярного фотоперемикання. При цьому є можливість реалізувати високу стійкість носія інформації для записуючого шару і для розчину, який використовується при виготовленні записуючого шару, а також забезпечити величину фотоіндукованої зміни показника заломлення фотохромних сполук достатньою для надійного неструктурного зчитування оптичної інформації, зареєстрованої в фотохромних матеріалах.

Наведені результати створення запам'ятовуючого пристрою на основі оптичної

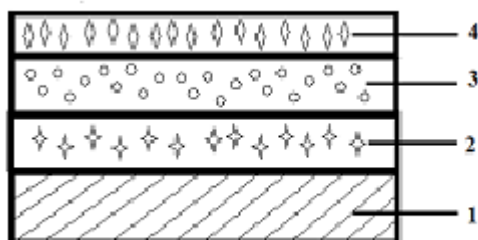


Рис. 27

нанопам'яті, який має органічне молекулярне запам'ятовуюче середовище на основі краунвмісного стирилового барвника і набір оптичних засобів для переведення вказаного середовища з одного стану в інший. На рис. 27 показано принцип побудови запам'ятовуючої структури, яка містить підкладку 1 із запам'ятовуючою структурою 2, розташованою поверх підкладки та відображаючого шару 3, розташованого поверх запам'ятовуючої структури 2 і захисного лакового шару 4, розташованого поверх відображаючого шару 3.

На рис. 28 показана схема формування запам'ятовуючої структури 2 на основі краунвмісного стирилового барвника. На рис. 29 показана схема утворення запам'ятовуючого елемента. Елементи запам'ятовуючої структури 2, розташовані на підкладці 1, здатні функціонувати в рядках та стовпцях, що становлять матрицю. Для формування запам'ятовуючої структури 2 промінь лазера взаємодіє з елементами запам'ятовуючої структури на основі краунвмісного стирилового барвника.

Підкладка 1 виготовлена з прозорого полімерного матеріалу – полікарбонату. Дана запам'ятовуюча структура 2 відноситься до типу структур для цифрового оптичного запам'ятовуючого пристрою, де інформація записується на тонкому шарі за допомогою світлового імпульсу високої інтенсивності, зазвичай сильно

сфокусованого лазерного променя на довжині хвилі 570 нм. Після того, як інформація записана на шарі запам'ятовуючої структури 2, він не може бути повернутий у свій початковий стан, але інформація може бути зчитана багато разів за допомогою слабкого світлового променя, який не робить додаткового впливу на фізичний стан шару. Шар записує інформацію в результаті змін під впливом потужного записуючого світлового імпульсу і є фактично шаром, який запам'ятовує інформацію. Технологія оптичного пристрою, що запам'ятовує майже виключно заснована на відбивальному контрасті між записаними знаками в запам'ятовуючому шарі або його безпосередньому оточенні. Сфокусований лазерний промінь пропускається уздовж запам'ятовуючого шару, і записуються зміни сили відбитого лазерного світла, коли промінь проходить записаний текст. Типовий текст може бути у вигляді невеликих круглих або подовжених заглиблень розміром між 0,5 і 7 мкм.

На рис. 28 елементи запам'ятовуючої структури 2 можуть представляти двійковий "0" або двійкову "1", і проміжок між суміжними елементами запам'ятовуючої структури 2 може представляти двійкову 1 або двійковий 0, причому флуоресценція в цьому проміжку випускається самою запам'ятовуючою структурою 2.

Ступінь гасіння флуоресценції може бути встановлено для запам'ятовуючої структури 2 наступним чином. Це може бути зроблено, як показано на рис. 28 і рис. 29, на яких записуючий імпульс, тобто промінь лазерного світла падає на запам'ятовуючу структуру 2 (рис. 28), розм'якшуючи і розплавляючи матеріал в флуоресцентному шарі запам'ятовуючої структури 2 (рис. 29), утворюючи елементи запам'ятовуючої структури 2 в вигляді поглиблення в цій структурі.

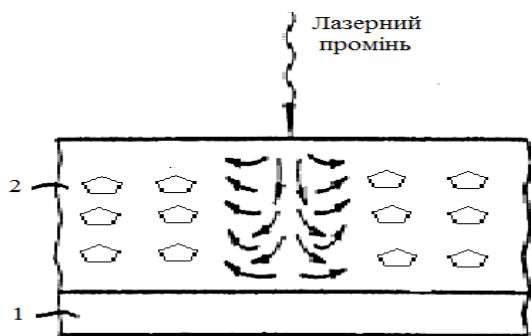


Рис. 28

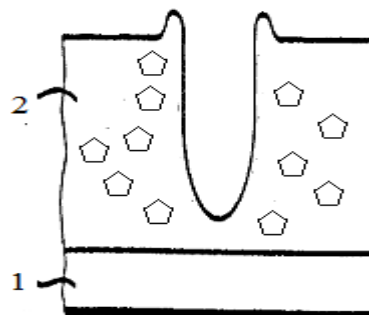


Рис. 29

У п'ятому розділі вирішувались проблеми апаратної реалізації реєстрації стану молекулярних структур, зокрема, з використанням надчутливого магнітометра з надпровідним датчиком та фотоплетизмографом. В основі робіт з реєстрації просторової взаємодії термохімічних потенціалів молекулярних структур був використаний магнітометр на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика.

Увага до молекулярної електроніки, зокрема, біоелектроніки пов'язана із

можливостями значного збільшення щільності пам'яті, оскільки сучасний транзистор має розміри в кілька сотень нанометрів і стає надмірно дорогим. Далі будь-які витрати вже не матимуть сенсу, оскільки наблизяться фундаментальні фізичні обмеження.

Проблемою реалізації програм створення елементної бази молекулярної електроніки є реалізація інтеграції молекул або інших наночастинок в закінчені функціональні електронні пристрої, які пов'язані один з одним і із зовнішніми пристроями обчислювальної техніки. Інформація передається або зберігається в них у вигляді електронів або різниці електричних потенціалів, які можуть визначатись кількістю електронів.

З іншого боку, значні можливості у вирішенні зазначених проблем видаються в біоелектроніці. Дійсно, живі клітини природним чином являють собою пристрої пам'яті. Більш того, в біологічних структурах вони взаємодіють особливим чином один з одним при передачі потоків даних. Необхідно досліджувати зазначені можливості біосистем, у тому числі і молекулярної пам'яті. Для реєстрації станів молекулярної пам'яті були проведені експерименти з використанням магнітометра на основі надпровідного квантового інтерферометричного датчика (НКВІД – магнітометра) для вивчення просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при роботі молекулярної пам'яті (рис. 30).

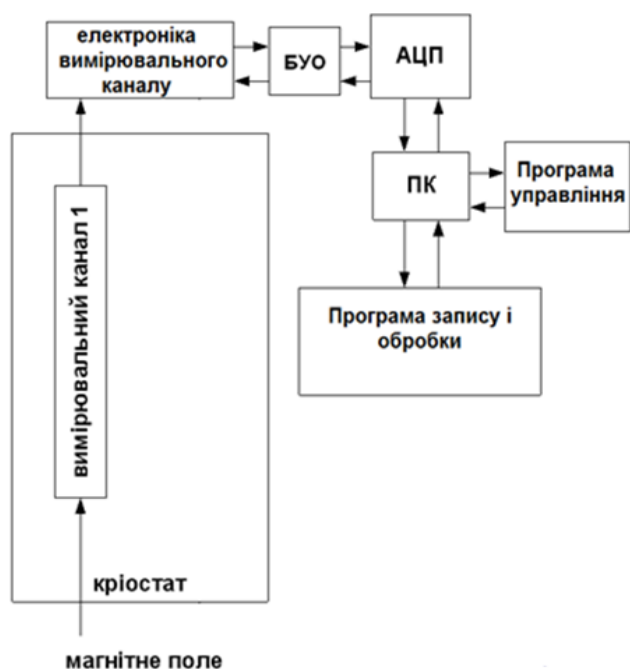


Рис. 30

страції станів молекулярних структур. Результат може бути використаний при подальшому вивченні процесів обробки та зберігання даних при діагностиці організму людини.

В результаті експериментів були виявлені кореляції магнітного і електричного полів (табл. 2 та рис. 31). Діапазон електричного поля – 0 – 50 мВ. Діапазон магнітного поля 0 – 150 пТл. На графіках видно кореляцію між коливаннями електричного та магнітного полів.

В даному випадку властивості молекулярної пам'яті використовувались для реєстрації стану рефлексно-сенсорних модулів (PCM) на поверхні тіла людини. У вказаних модулях (по властивостях подібних до біологічно активних точок) інтегрується результат дії багатьох хімічних реакцій ферментних систем, маркером яких є термохімічний потенціал. Сума енергетичного еквіваленту продуктів ферментних реакцій складає сумарну величину термохімічних потенціалів у вигляді енергетичного поля. Прилад поєднує реєстрацію стану молекулярної структури з провідності і магнітограми в досліджуваній ділянці.

Крива магнітного поля є магнітною складовою просторового поля термохімічних потенціалів, тобто є ланкою реє-

Таблиця. 2. Результати реєстрації молекулярної пам'яті шляхом вимірів електропровідності та магнітного поля в РСМ-модулях людини

| Умовні точки | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----------------------------------|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Час, сек | | 5 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 | 55 | 60 |
| Електричний потенціал (E=0-50 мВ) | Верх. знач. | 32 | 36 | 49 | 47 | 35 | 40 | 41 | 41 | 42 | 41 | 35 | 30 |
| | Сер. знач. | 28 | 32 | 46 | 42 | 33 | 38 | 39 | 39 | 40 | 39 | 33 | 28 |
| | Ниж. знач. | 26 | 30 | 43 | 37 | 31 | 36 | 37 | 37 | 38 | 37 | 31 | 26 |
| Магнітне поле, (H=0-150 нТл) | Верх. знач. | 107 | 121 | 163 | 156 | 117 | 130 | 137 | 137 | 140 | 137 | 117 | 100 |
| | Сер. знач. | 97 | 110 | 153 | 140 | 110 | 125 | 130 | 130 | 134 | 130 | 110 | 97 |
| | Ниж. знач. | 91 | 102 | 144 | 123 | 103 | 120 | 123 | 123 | 127 | 123 | 103 | 93 |

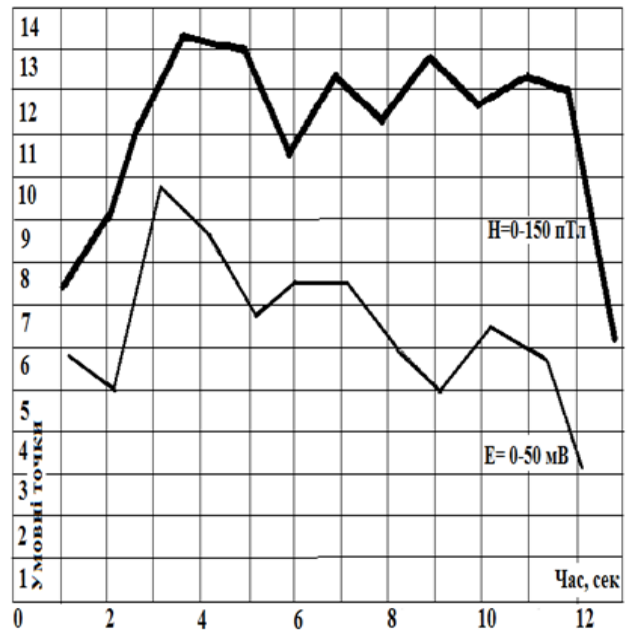


Рис. 31

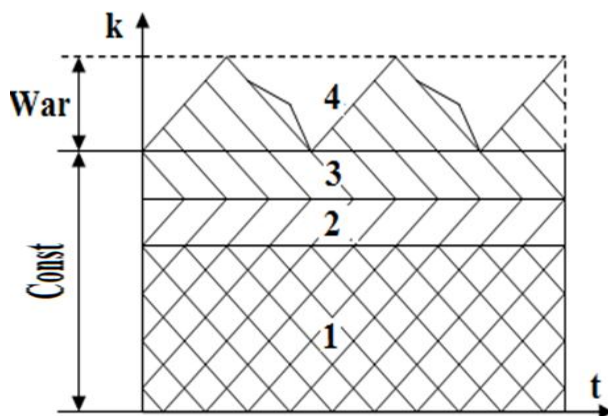


Рис. 32

Важливою ланкою при реєстрації станів молекулярних структур є дослідження процесів формування інформаційного сигналу точкової реєстрації зміни оптичної густини крові при взаємодії оптичної головки з молекулярною структурою гемоглобіну (рис. 32). Сигнал від 2-х світлодіодів проходить через компоненти біотканини. Компоненти 1–3 відповідають постійній складовій кровонаповнення Const, а 4 – змінній складовій кровонаповнення War.

На рис. 33 показано будову оптичної пальцевої головки, а на рис. 34 – принцип взаємодії оптичної головки з молекулярною структурою пептиду гемоглобіну.

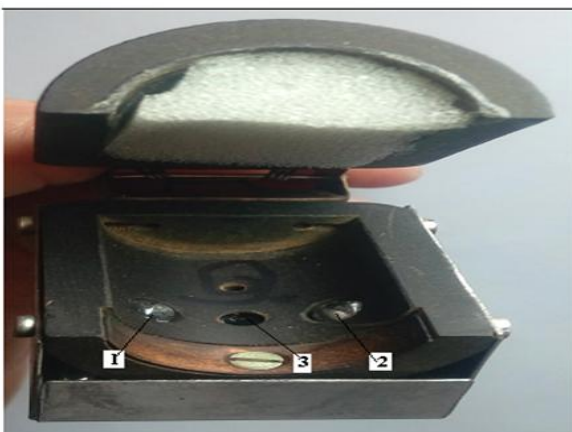


Рис. 33

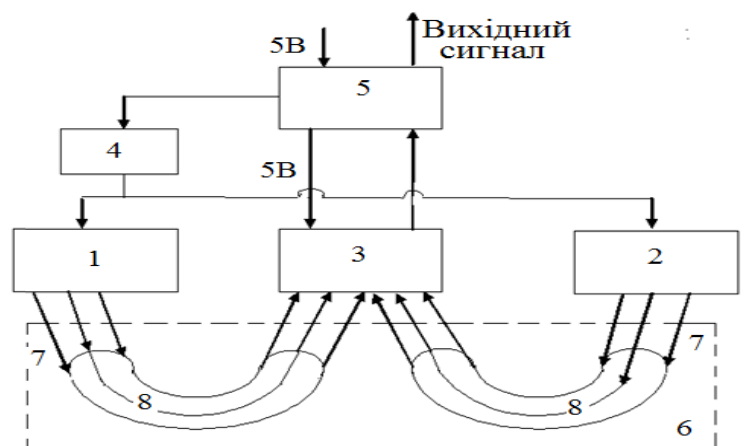


Рис. 34

Оптична пальцева головка складається з 2-х світлодіодів та оптоелектронного перетворювача. Сигнал формується при взаємодії червоного випромінювання (630 нм) з молекулярною структурою гемоглобіну. Світло поглинається молекулами гемоглобіну крові та надходить на вхід оптоелектронного перетворювача для підсилення сигналу з подальшою обробкою програмними засобами.

У шостому розділі вирішувались задачі створення нового запам'ятовуючого пристрою на основі принципів роботи полімерних ланцюгів нуклеїнових кислот ДНК та РНК, які є найдосконалішими запам'ятовуючими пристроями, створеними природою. Схеми формування молекулярної пам'яті показані на рис. 35 та 36.

Для вивчення механізмів роботи довготривалої пам'яті були створені моделі формування запам'ятовуючих структур з використанням системи: ядро нейрона – синаптичні структури в структурах нейронів біосистем та модель механізму спрацювання синапсу (рис. 35). Синапс є контактною площадкою між нейронами.

Через синапс в ядро нейрона та в зворотньому напрямі передаються команди про формування молекулярних запам'ятовуючих структур. На рис. 36 показана модель процесу формування довготривалої молекулярної пам'яті, який відбувається з використанням «програмних засобів» з такою послідовністю: визначення важливості – посилення синапсами багаторазових команд про це в нейрон – відкриття відповідних генів – створення білків пам'яті, які ставлять клеймо на вихідних синапсах. Якщо подія досить важлива або повторюється багато разів, то синапси змушують нейрон, у свою чергу, видавати нервові імпульси інтенсивно і багаторазово, заявляючи тим самим, що дану подію слід запам'ятати. Включаються відповідні гени, білки пам'яті відшукують ті синапси, в яких утримується короткочасна пам'ять і на них ставиться відповідна мітка. Для зміцнення синаптичних входів потрібні процеси навчання. У цьому процесі задіяний спеціальний білок Npas4. Цей білок керує силою зв'язку між нейронами в області гіпокампу. Без нього довгострокова пам'ять не може формуватися – синапси не зміцнюються і організм не запам'ятовує подію.

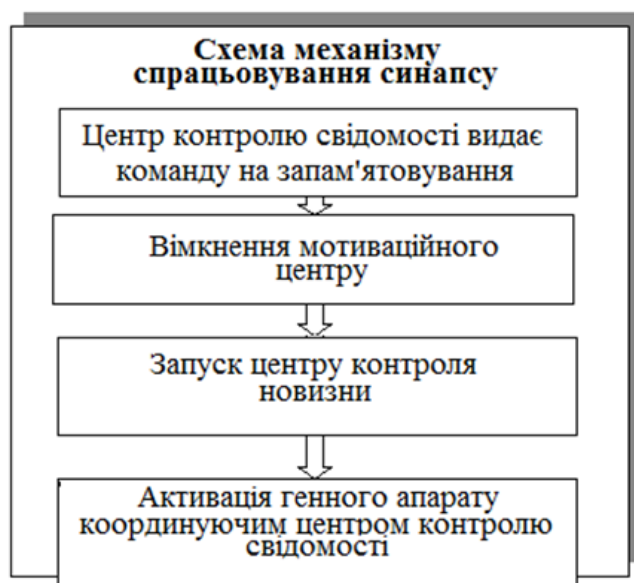


Рис. 35

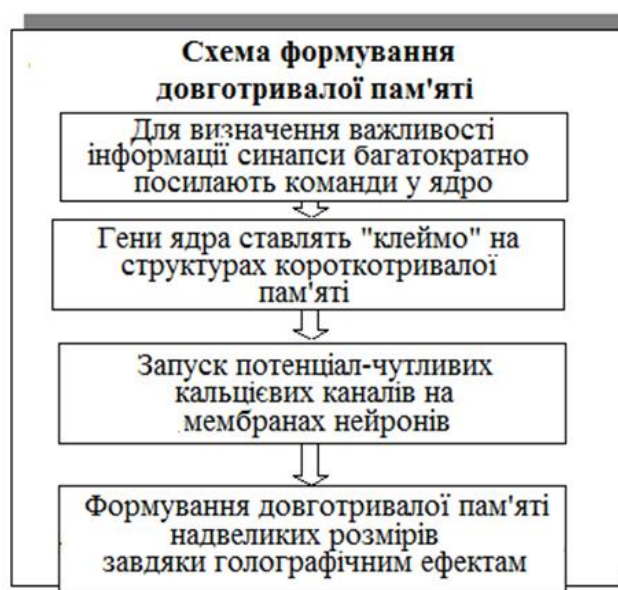


Рис. 36

Важливою перевагою застосування полімерних ланцюгів нуклеїнових кислот у складі ДНК та РНК є наявність в останніх програм з керування пам'яттю та значної щільності запису інформації (до десятків пБ на кв.дм) і високий паралелізм обробки інформації, а також використання переваг та особливостей обробки в нейронних системах біосистем.

Узагальнена модель формування молекулярного запам'ятовуючого елемента в синаптичній мережі. Для побудови узагальненої моделі формування молекулярного запам'ятовуючого елемента використаємо ряд формалізмів, включаючи поняття програмних агентів у вигляді ділянок на молекулах керуючих білків і ряду спеціальних генів.

При протіканні струму від збуджених нейронів через синапси в прямому напрямку на них запам'ятовуються поточні результати розпізнавання. Такому запам'ятовуванню відповідає збільшення прямих і зворотних ваг (прямой і зворотної провідності) цих синапсів. В цьому випадку використаємо:

$$g_{ij}(t) = g_{ij}(t-1) + B(I_{ij}(t)), \quad (18)$$

де $g_{ij}(t - 1)$ – число одиничних образів (ОО), що запам'ятались на синапсі на попередньому часовому такті; в $(I_{ij}(t))$ – ефект від взаємодії нейронів при протіканні струму $I_{ij}(t)$ через синапс у прямому напрямку. При проходженні струму зустрічно через інші синапси їх прями і зворотні ваги (зворотні і прями провідності) зменшуються. З огляду на це амплітуду імпульсного струму, що проходить в прямому напрямку через кожен синапс щодо моменту часу t , можна визначити як:

$$I_{ij}(t) = I_{cp} I_{j\Sigma}(t) w_{ij}(t) \delta_i(t) / \sum_{j=1}^n w_{ij}(t), \quad (19)$$

де $w_{ij}(t)$ – прями ваги (провідності) синапсів; I_{cp} – середня амплітуда струму, $I_{j\Sigma}(t)$ – сумарний струм відображення одиничних образів запам'ятовування від j -го нейрона, $\delta_i(t)$ – функція, що приймає значення 1, коли i -й нейрон збуджений.

Оскільки нейрон являє собою пороговий елемент і на його входах є збуджуючі та гальмівні синапси, то сам нейрон є суматором для визначення зваженої суми ваг синапсів як реакції на входні сигнали у вигляді синаптичних струмів. При перевищенні такої суми порога нейрона виробляється вихідний сигнал згідно рівняння:

$$Y_j = F(x_i w_{ji} X_i - K_j) P_{пр}, \quad (20)$$

де j – номер нейрона в мережі, X_i – входний сигнал, Y_j – вихідний сигнал нейрона, w_{ji} – ваги синапсів, K_j – поріг нейрона, $F(x)$ – активаційна функція, що спрацьовує при досягненні порогового сумарного значення струму на групі синапсів, $P_{пр}$ – показник міцності синапсу.

Процеси, що відбуваються при протіканні струмів через синапси під час запам'ятовування одиничних образів дозволяють використовувати поняття програмних агентів, які отримують інформацію через систему молекулярних

сенсорів про стан керованих ними процесів і здійснюють вплив на них через систему актуаторів, які передають вплив з керуючого пристрою на об'єкт управління. Щоб активно виконувати свої функції, інтелектуальні агенти зазвичай мають ієрархічну структуру, яка включає багато субагентів. Такими в нашому випадку є ділянки на молекулах керуючих білків і ряд спеціальних генів. Для роботи зазначених агентів необхідно прийняти наявність своєрідного розподільника функцій агентів, який оновлює комунікаційні залежності між агентами і локально сформованими групами агентів на різних вузлах синаптичної мережі. Комунікаційна залежність $C_{ij}(t)$ між i -им агентом і j -ою групою агентів в момент часу t визначається за формулою:

$$C_{ij}(t) = \sum \alpha (M_{ij}(t) / \sum_k M_{ik}(t)) + (1-\alpha) C_{ij}(t-1), \quad (21)$$

де $M_{ij}(t)$ – число повідомлень, відправлених i -им агентом агентам j -ої групи агентів за період часу t , α – коефіцієнт, що характеризує відносну значимість нової інформації, $\sum_k M_{ik}(t)$ показує кількість повідомлень, відправлених i -им агентом для інших агентів, спільно функціонуючих на загальному вузлі синаптичної мережі, $C_{ij}(t-1)$ – значення тієї ж комунікаційної залежності на попередньому інтервалі часу.

Важливим параметром стійкості формування молекулярного елемента в синаптичній мережі є показник міцності синапсу $P_{пр-с}$, який залежить від процесів, що відбуваються при протіканні струмів через синапси під час запам'ятовування одиничних образів. Міцність синапсів обумовлює рівень пам'яті: чим сильніше з'єднання між нейронами, тим довше буде працювати конкретний нейронний ланцюг, який зберігає певну інформацію. Однак занадто сильний синапс може стати причиною перезбудження нейронів, що в підсумку виливається в хворобливий стан.

Від міжнейронного з'єднання вимагається подвійне завдання: з одного боку, синапс має підтримувати надійне проведення значимого сигналу, з іншого – зобов'язаний бути до певної міри слабким, щоб не допускати абсолютно безперешкодного отримання сигналів, який може перезбудити нейронний ланцюг. Важлива наявність спеціального білка $A_{гс}$, який накопичується в синапсах при запам'ятовуванні нової інформації. Після формування запам'ятовуючих структур в синапсі цей білок йде із зони синапсу і направляється в ядро нейрона. Зазначені переміщення забезпечують у самій молекулі білка три ділянки. Один фрагмент забезпечує пересування білка в ядро, інший – з ядра, третій утримує $A_{гс}$ в ядрі.

Такі функції зазначеного білка можуть бути описані наступними рівняннями:

$$P_{пр-с} = \sum_{k=1}^n P_{об-с} + P_{я} + P_{ся} + P_{яс}, \quad (22)$$

де $P_{пр-с}$ – показник міцності синапсу, $P_{об-с}$ – активація фрагмента білка $A_{гс}$ на навчання синапсу при запам'ятовуванні нової інформації, $P_{я}$ – активація фрагмента в ядрі нейрона, $P_{ся}$ – активація фрагмента при пересуванні з синапсу в ядро, $P_{яс}$ – активація фрагмента при пересуванні з ядра в синапс.

$$P_{\text{яф-arc}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{arc}} + P_{\text{нс}} + P_{\text{ос}}, \quad (23)$$

де $P_{\text{яф-arc}}$ – сумарний вплив ядерного фрагмента білка Arc при формуванні молекулярного запам'ятовуючого елемента в синаптичній мережі, P_{arc} – активація фрагмента білка по включенню генів формування синапсу, $P_{\text{нс}}$ – активація фрагмента білка при створенні нового синапсу, $P_{\text{ос}}$ – активація фрагмента молекули білка при ослабленні синапсу.

Таким чином процес формування молекулярного запам'ятовуючого елемента в синаптичній мережі може бути представлений у вигляді системи рівнянь:

$$I_{ij}(t) = I_{\text{cp}} I_{i\Sigma}(t) w_{ij}(t) \delta_i(t) / \sum_{j=1}^n w_{ij}(t), \quad (24)$$

$$Y_j = F(x_i w_{ji} X_i - K_j) P_{\text{пр}}; \quad (25)$$

$$C_{ij}(t) = \sum \alpha (M_{ij}(t) / \sum k M_{ik}(t)) + (1-\alpha) C_{ij}(t-1); \quad (26)$$

$$P_{\text{пр-с}} = \sum_{k=1}^n P_{\text{об-с}} + P_{\text{я}} + P_{\text{ся}} + P_{\text{яс}}; \quad (27)$$

$$P_{\text{яф-arc}} = \sum_{i=1}^n P_{\text{arc}} + P_{\text{нс}} + P_{\text{ос}}. \quad (28)$$

Отримана система рівнянь дозволяє використовувати останню в практичних експериментах з отримання та вивчення молекулярних запам'ятовуючих елементів, а після відповідних напрацювань, і запам'ятовуючих молекулярних механізмів, на три з яких були отримані авторські свідоцтва.

Використовуючи математичну модель функцій синапсу як керівної ланки при роботі нейрона в роботі досліджено етапи побудови молекулярних запам'ятовуючих структур шляхом реалізації моделі провідності синаптичного контакту.

Показано, що при надходженні інформації в ядро, в ньому приймається рішення про підтримку стану синапсу і здійснюється передача відповідних сигналів у зону синаптичного контакту. Дані формули є математичною моделлю синаптичного контакту. Вони описують передачу імпульсу між синапсами нейронів, процес зміни порогу нейрона в залежності від стану синапсу, процес зміни потенціалу нейрона, а також струм, який передається по синапсах у момент генерації потенціалу дії для активації нейрона. Клітинний комп'ютер «обчислює», як відреагувати на цей сигнал, і робить запит в ядро нейрона. Там включається одна ієрархія програм, що веде до створення іншої групи програм поведінки синаптичних структур нейрона шляхом розрізання та повторного склеювання частин ДНК ядра за конкретними програмами, які перебувають в тій же ДНК. Іншими словами, діє саме так, як і звичайний комп'ютер, тобто на основі інструкцій (команд) і їх виконання. Процес формування пам'яті визначає сигнал, що проходить за певним шляхом, запалює по дорозі всі пройдені ним нейрони і на карті мозку спалахне слід цього пробігу. Кожен такий

слід є мозковий еквівалент того впливу (образу, звуку, переживання або поняття), яке породило первинний сигнал.

Для того щоб зберегти цей слід у вигляді "спогаду", тобто того, що можна потім знову викликати в свідомості, потрібно якимось чином "записати" цей слід. Це завдання якраз і виконують синапси – проміжки між точками з'єднання двох різних нейронів. При кожному проходженні даного сигналу за своєю системою нейронів ті й тільки ті синапси, які з'єднують ці нейрони в єдиний "слід", стають, грубо кажучи, більш "провідними". Багаторазове проходження одного й того ж сигналу у вигляді мотиваційного наказу створює на карті мозку невелику "підкарту" змінених синапсів. Сукупність таких "підкарт" утворює нашу пам'ять.

Однак молекули білків існують в клітинах, як правило, короткочасно: лише деякі все наше життя, а більшість – дні, годинник або навіть хвилини. Вони розпадаються, виконавши своє завдання в життєвому процесі, а на зміну їм виробляються інші, згідно з інструкціями тих чи інших генів. І якщо тільки згаданий "спогад" не відображено в генах (і в їх інструкціях), то нові білки вже не будуть їх утримувати.

Для вивчення механізмів роботи нейрона та його ядра запропоновано модельне представлення ДНК ядра нейрона як молекулярної обчислювальної машини (рис. 37). Показані принципи моделювання властивостей ДНК по зберіганню програм для роботи нейронів, виконанню команд та автокопіюванні. Розглянуто можливості ДНК як молекулярної обчислювальної машини з програмним забезпеченням на спеціалізованій мові програмування із застосуванням символічного представлення світу завдяки системі відсилай для зв'язків реального світу з внутрішніми символами мислення.



Рис. 37

світу з внутрішніми символами мислення.

Зокрема, потоки імпульсів створюють різний розподіл йонних концентрацій вздовж молекули РНК і викликають специфічні для кожного сигналу переміщення нуклеотидів ланцюга. Властивості структури організму в символічному вигляді представлені на молекулярному рівні всередині ядер клітин нейронів. Пам'ятний слід відображає просторові характеристики сигналів «патерну синапсів», кодуючи своїм розташуванням і станом сигнали. Рецептори синаптичних мембран активують різні нуклеотиди ДНК.

Приведені результати експериментів з визначення залежностей різних структур ДНК проводити струм при прикладанні

напруги між підкладкою та вістрям скануючого тунельного літографа (СТЛ) для визначення використання молекул ДНК як елементів молекулярної електроніки, зокрема, випрямляючих діодів. Показана залежність сили тунельного струму через молекулярну структуру ДНК від величини напруги між підкладкою та вістрям СТЛ (рис. 38), а також залежність, коли як молекулярна структура була

використана комплексна сполука ДНК-бета-каротину (рис. 39). Із графіків видно, що остання структура здатна проводити струм на кілька порядків вище, ніж чиста ДНК.

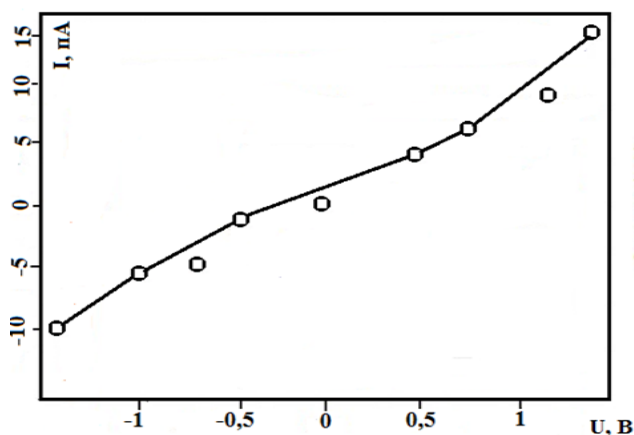


Рис. 38

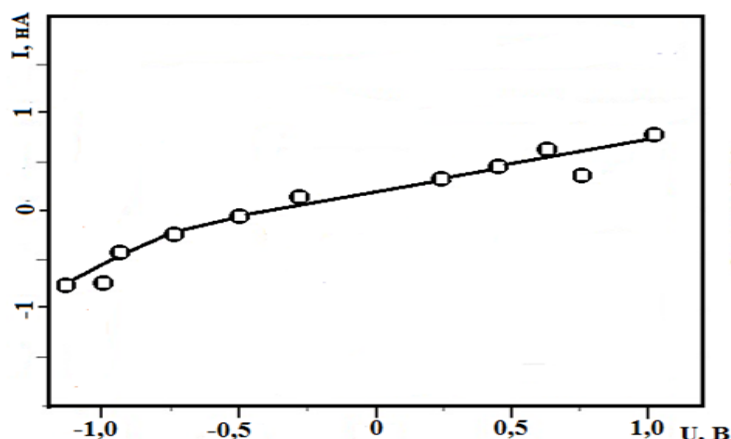


Рис. 39

Підходи до розробки запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації на основі синтезу ДНК. В даній роботі була поставлена задача створити такий пристрій, в якому, через введення нових елементів було б можливо реалізувати синтез ДНК з використанням РНК для передачі інформації від джерела інформації на місце постійного зберігання інформації в ДНК за допомогою РНК-залежної ДНК-полімерази.

Приведені результати розробки запам'ятовуючого пристрою надвисокої щільності запису інформації з використанням механізму запису на ДНК. Схема використання в даному пристрої стохастичного резонансу шляхом вибору робочої точки МДН-структури сенсора посередині ділянки бістабільності ВАХ і введенням сигналу шуму від генератора шуму показана на рис. 40.

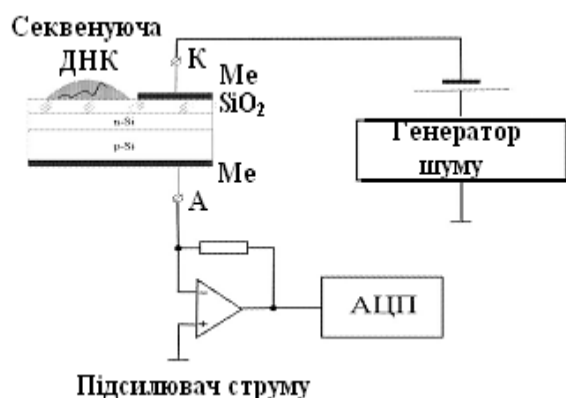


Рис. 40

Режим стохастичного резонансу дозволяє підсилювати вихідний періодичний сигнала під дією шуму. Технічний результат досягається за рахунок подачі слабкого сигналу, що поступає із сенсора на вхід електронної схеми, яка має область бістабільності і в якій може бути зформовано стохастичний резонанс. При цьому підвищується відношення сигнал/шум при подачі на електронну схему слабкого сигналу та шуму.

Схема запам'ятовуючого пристрою показана на рис. 41. До складу схеми входять структура ДНК (1) та структура РНК (2).

Блок детекції (3) елементів ДНК на основі МДН-структури, що дозволяє забезпечити роботу сенсора посередині ділянки бістабільності на його ВАХ за рахунок зміщення робочої точки МДН-структури, для

чого один вихід джерела зсуву (6) підключений до катода пристрою, а інший вихід підключений до генератора шуму (7). Анод МДН-структури є виходом сенсора і підключений до одного з входів підсилювача струму (4). Сигнал з підсилювача струму надходить до аналого-цифрового перетворювача (5), пов'язаного з комп'ютерною системою (8).

Першим етапом роботи запам'ятовуючого пристрою (рис. 41) є проведення робочого циклу виділення фрагментів ДНК. При цьому здійснюють детектування моменту приєднання нуклеотиду до зростаючого ланцюга ДНК за рахунок вимірювання сигналу від кожного сенсора, виконаного на МДН-структурі з можливістю реєстрації або зміни концентрації іонів водню на фрагменті ДНК, що полімеризується в розчині полімеризації, у режимі стохастичного резонансу.

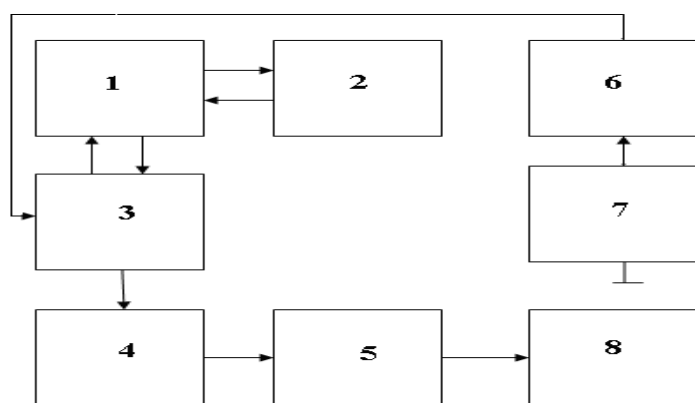


Рис. 41

Реєстрацію факту розділення зарядів, зокрема реєстрацію виділення іона водню в розчин при приєднанні ДНК-полімеразаю чергового нуклеотиду здійснюють за допомогою вимірювання провідності розчину при проведенні в ньому реакції полімеризації ДНК. Реєстрацію факту виділення іона водню в розчин здійснюють за допомогою напівпровідникового сенсора, що представляє собою МДН-структуру. Шар діелектрика в останньому є наноструктурою з товщиною

50 нм, в якій протікає тунельний струм носіїв заряду. В ході полімеризації ДНК виділяється йон водню, який дією свого заряду змінює електричне поле в діелектрику, що змінює величину емісії електронів у діелектрик з металу і як результат – змінює величину загального струму через МДН-структуру. МДН-структура складається з багатошарової конструкції, що включає з'єднаний з анодом перший металевий контакт, який розміщений на нижньому шарі p-Si, верхня поверхня якого з'єднана з нижньою поверхнею шару n-Si, верхня поверхня якого покрита шаром діелектрика, що складається з алмазоподібної плівки, на верхній поверхні якого є робоча зона для іммобілізації фрагментів ДНК.

Реконструкцію інформаційної послідовності секвенуючої ДНК по затримкам в ході реакції полімеризації фрагментів ДНК здійснюють наступним чином. В рідинну систему РНК 2 додають розчин РНК-залежної ДНК-полімерази.

В рідинній системі РНК 2 відбувається синтез ДНК на матриці РНК, що і є ефектом реалізації запам'ятовуючого пристрою з надвисокою щільністю запису інформації. Відповідно до експериментальних даних, довготривала пам'ять може бути результатом виникнення нових синапсів, які фіксуються по зворотньому зв'язку в ДНК. Важливість досліджень та розробок нових типів пам'яті в даній роботі наглядно видно із табл. 3.

Як видно із таблиці, розроблені та досліджені в дисертації види пам'яті, а саме їх зміною фазового стану, із зміною опору, зі зміною послідовності елементів

нуклеїнових кислот мають високі параметри: розмір комірки – 80–100 кв.нм, час запису/ стирання – до 5–10 нс.

Таблиця 3. Види енергонезалежної пам'яті на нових принципах

| Енергонезалежна пам'ять на нових принципах | | | | | | |
|--|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------------------------|--------------------------------|------------------------------------|
| Тип | MRAM | PRAM | ReRAM | FeRAM | STTRAM | NAM |
| T – транзистор; D – діод; R – резистор | 1(2)T-1R | 1T-1R або 1D1R | 1T-1R або 1D1R | 1T1C | 1(2)T-1R | Молекулярний ланцюг |
| Принцип роботи комірки | Магнітний опір | Зміна фазового стану | Зміна опору | Зміна напрямку поляризації | Зміна обертового моменту спіна | Зміна елементів нуклеїнових кислот |
| Мінімальна норма – 20 нм | 20F ² | 4.8 (4)F ² | 4F ² | 22F ² | 6–20F ² | <10 нм |
| Час запису/стирання | 10 нс/ 10 нс | 20 нс/ 50 нс | 5 нс/ 5 нс | 10 нс/ 10 нс | 5–20 нс/ 10 нс | <10с/<10с |
| Кількість циклів | >3·10 ¹⁶ | >10 ⁸ | >10 ¹⁰ | 10 ¹⁴ | 10 ¹⁵ | >10 ¹⁸ |
| Використання | Зберігання | Зберігання | Зберігання/ оперативна пам'ять | Зберігання | Зберігання | Зберігання |
| Споживання | 10 пДж | пДж | <10 пДж | <10 пДж | <10 пДж | <10 пДж |

Вимоги до створення нейроморфних комп'ютерних платформ та можливості застосування в них запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації приведені в табл. 4 та 5.

Таблиця 4. Вимоги до створення нейроморфних комп'ютерних платформ

| | |
|---|---|
| Вимоги до створення нейроморфних платформ (на основі універсальних процесорів, середовища із інтеграцією оперативної та довготривалої пам'яті і багаторівневих логічних станів) | |
| 1. | Надвисока щільність пам'яті при зменшенні вартості біта |
| 2. | Збільшення числа циклів перемикавання (операцій запису-стирання) |
| 3. | Збільшення часу зберігання інформації в запам'ятовуючих пристроях |
| 4. | Збільшення швидкості програмування та доступу до комірок |
| 5. | Зменшення енергії електроспоживання |
| 6. | Збільшення можливостей реалізації мобільних пристроїв |

Таблиця 5. Можливості нейроморфних технологій

| | |
|--|---|
| Можливості нейроморфних технологій (НТ) (побудовані на об'єднанні збереження та обробки даних в одній системі) для створення надпотужних комп'ютерів, подібних до мозку людини | |
| 1. | Електронний 3D –синапс є процесором та пристроєм зберігання даних |
| 2. | Один з важливих концептів НТ є синапс із перемикаючим опором із зміною на кілька порядків за рахунок перебудови кисневих вакансій |
| 3. | 3D –синапс може інтегрувати біти та спрацьовувати при досягненні порога |
| 4. | Оптичні імпульси проходять матеріал і перемикають середовище пам'яті подібно синапсу |
| 5. | Багаторівневий постійний запам'ятовуючий пристрій з перехресним перемиканням на основі ДНК |

Як видно із табл. 4 та 5 досить важливим доробком є реалізація електронного 3D синапсу із перемикаючим опором у межах його зміни на кілька порядків. Процес проходить за рахунок міграції і перебудови кисневих вакансій у середині оксиду. Також важливими результатами є реалізація пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації при зменшенні вартості біта, збільшення швидкості доступу до комірок пам'яті, створення запам'ятовуючого пристрою із застосуванням елементів нуклеїнових кислот, значне зменшення енергоспоживання.

Враховуючи, що сучасні запам'ятовуючі пристрої швидко наближаються до технологічних меж своєї продуктивності, застосування запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації для побудови нейроморфних комп'ютерних платформ дасть можливість використовувати нові підходи до обробки інформації.

ВИСНОВКИ

В дисертації розроблено теоретичний базис для моделювання фізичних та технологічних процесів, проведено аналіз роботи запам'ятовуючих структур з надвисокою щільністю запису інформації на основі нових та вдосконаленні існуючих методів твердотільної електроніки, а також представлені результати експериментальних досліджень і розробки вказаних структур для реалізації нових запам'ятовуючих пристроїв.

1. Вперше розроблена технологія виготовлення наноструктур для запам'ятовуючих структур з мінімальними розмірами формованих топологічних елементів і високою точністю їхнього взаєморозташування за допомогою тунельно-зондових технологій на основі перетворення даних топології інтегральних схем, отриманих при проектуванні, у топологію шаблону або структурного шару на підкладці.

2. Вперше запропоновано нові методи отримання наноструктур для запам'ятовуючих пристроїв на основі локального анодного окислення, а саме отримання базових елементів структур пам'яті з використанням різних вістрів атомносилового літографа та режимів величини і тривалості імпульсів напруги при різній відносній вологості, які забезпечують значну продуктивність.

3. Вперше запропоновано метод отримання мемристорних нанoeлектронних структур для електронних нейроморфних чипів з використанням запам'ятовуючої матриці, опір якої змінюється при проведенні запису і стирання інформації і може бути використаний в створенні нейронних та синаптичних структур.

4. Вдосконалено метод отримання структур молекулярної пам'яті на основі білка бактеріородопсину із досягненням надвисокої щільності запису інформації. Процеси збудження молекулярної структури розділені в часі, що дозволяє повністю виключити фотохімічні процеси поза опроміненого об'єму для забезпечення обробки інформації з високими ємністю, паралелізмом і ієрархічністю для оптичної пам'яті в системах обробки зображень, зокрема, в системах технічного зору.

5. Вперше розроблено метод створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації з використанням технології побудови оптичної молекулярної нанопам'яті із застосуванням органічного молекулярного запам'ято-

вуючого середовища на основі краунвмісного стирилового барвника і молекулярної інженерії фотоперемикаючих молекулярних пристроїв.

6. Вперше створена модель роботи молекулярної пам'яті з використанням характеристик електропровідності та магнітного поля в рефлексно-сенсорних модулях на поверхні тіла людини та особливостей реєстрації просторової взаємодії термохімічних потенціалів клітини при застосуванні НКВІД-магнітометра.

7. Вдосконалено модель реєстрації молекулярної пам'яті з використанням процесів формування та обробки інформаційного сигналу при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярною структурою гемоглобіну та визначені умови локальної реєстрації зміни їх оптичної густини.

8. Вперше розроблено метод створення запам'ятовуючих структур з надвисокою щільністю запису інформації з використанням молекулярних технологій на основі принципів обробки інформації в полімерних нуклеїнових кислотах у системах нейронів та їх ядерних компонентах – ДНК і РНК.

Список основних опублікованих праць за темою дисертації:

1. Гераїмчук М.Д., Зінченко В.П., Лапінський В.В., Ходаковський М.І., Шут М.І., Гераїмчук І.М., Зінченко С.В., Шевчук Б.М. Інформаційні технології в освіті: засоби та методи. К.: НТУУ "КПІ". 2009. 88 с.

Здобувачем розроблено методику застосування комп'ютерних навчаючих систем з урахуванням принципів роботи молекулярної пам'яті та моделювання процесів запам'ятовування.

2. Medvedev I.V., Chechko G.A., Zolotopup A.I., Khodakovskiy N.I. Simulation of silicide layer formation process on silicon in LSI structure taking account of redistribution. *Engineering Simulation*, 1998. Vol. 15. P. 377–385.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження формування силіцидних шарів на кремнії для вдосконалення властивостей великих інтегральних схем.

3. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти. *Вестник Международной академии проблем человека в авиации и космонавтике*. М.: 2003. № 3(12). С. 78–79.

Здобувачем розроблені принципи роботи навчаючої комп'ютерної системи на основі ефекту молекулярної пам'яті.

4. Tydnyuk V.Z., Aleev L.S., Khodakovskii N.I. Field interactions and distinctive features of development of devices for diagnostics and correction of states of biologically active points. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2006. № 2. P. 157–165. (SCOPUS).

Здобувачем запропонована методика побудови пристроїв діагностики за допомогою вимірювань електричних та магнітних полів в рефлексно-сенсорних ділянках організму людини.

5. Ходаковский Н.И., Золот А.И., Мерзвинский П.А. Исследование наноструктур при взаимодействии ферментных систем и рефлексно-сенсорных модулей в организме человека. Сб. науч. тр. Института тепло- и

масообмена имени А. В. Лыкова НАН Беларуси. 2013. С. 120 – 125.

Здобувачем проведені дослідження стану молекулярних структур при визначенні дії ферментних систем в рефлексно-сенсорних ділянках організму людини.

6. Khodakovskiy M.I. A method for constructing memory devices with an ultrahigh information recording density. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2019. Vol.55, N 3. P. 496–502. (SCOPUS).
7. Ходаковский Н.И., Сытник А.Г. Особенности разработки систем технического зрения для восстановления зрительной функции человека. *Управляющие системы и машины*. 2000. № 2. С. 35–41. (РИНЦ).

Здобувачем виявлена та досліджена можливість використання молекулярного носія пам'яті бактеріородопсину при розробці систем технічного зору.

8. Тиднюк В.З., Будник Н.Н., Ходаковский Н.И. Разработка приборов для измерения направления и величины энергетических потоков меридианов физиологических систем человека. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 3. С. 35–42. (SCOPUS).

Здобувачем проведені дослідження стану рефлексно-сенсорних ділянок організму людини шляхом вимірювання їх енергетичних характеристик.

9. Золот А.И., Ходаковский М.И. Дослідження фізико-технологічних процесів формування наноструктур для створення наноприладів та керування їхніми властивостями. *Управляющие системы и машины*. 2007. № 1. С. 48–52. (РИНЦ).

Здобувачем запропоновано метод формування наноструктур та керування їхніми властивостями при створенні наноприладів.

10. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский А.А., Мержвинский П.А. Управление свойствами наноструктур при создании технологических процессов построения наноприборов. *Электроника и связь*. 2011. №1. С. 12–14. (Index Copernicus).

Здобувачем запропоновано метод керування властивостями наноструктур при створенні технологічних процесів побудови наноприладів.

11. Золот А.И., Ходаковский Н.И., Мержвинский П.А. Використання локального анодного окислення для створення запам'ятовуючих наноприладів. *Электроника и связь*. 2012. № 3. С. 14–18. (Index Copernicus).

Здобувачем проведені експериментальні дослідження процесів локального анодного окислення при створенні запам'ятовуючих наноприладів.

12. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Моделирование процессов запоминания в нейронных и семантических сетях естественного интеллекта. *Управляющие системы и машины*. 2014. № 3. С. 28–32. (РИНЦ).

Здобувачем запропоновано моделювання процесів запам'ятовування в нейронних мережах природного інтелекту для побудови запам'ятовуючих пристроїв.

13. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Математическая модель диагностики состояния здоровья человека с использованием биосистем. *Управляющие*

системы и машины. 2014. № 4. С. 18–22. (РІНЦ).

Здобувачем проведено вивчення та моделювання шляхів побудови діагностичних систем стану людини з використанням можливостей молекулярних структур біосистем.

14. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Построение модели состояния здоровья человека на основе работы иммунной системы. *Управляющие системы и машины. 2014. № 5. С. 23–28. (РІНЦ).*

Здобувачем проведено аналіз роботи імунної молекулярної пам'яті при оцінці стану здоров'я людини.

15. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Использование ассоциативной распределенной памяти в модели фиксирования знаний. *Управляющие системы и машины. 2015. № 3. С. 59–64. (РІНЦ).*

Здобувачем запропонована модель роботи асоціативної розподіленої пам'яті при формуванні запам'ятовуючих структур.

16. Ходаковский Н.И., Кузьменко Б.В. Построение автоматной модели обучения в компьютерных обучающих средах. *Управляющие системы и машины. 2016. № 1. С. 45–49. (РІНЦ).*

Здобувачем вивчена та побудована модель навчання в комп'ютерних навчаючих системах з використанням автоматного підходу.

17. Ходаковський М.І., Будник М.М., Риженко Т.М., Мержвинський П.А., Мудренко М.І., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Тимофеев Є.П., Расчектаева А.І. Оптичні вимірювання для неінвазивної гемоглобінометрії. *Український метрологічний журнал. 2017. № 4. С. 53–64. (CrossRef).*

Здобувачем запропонована методика атестації приладів для оптичних вимірювань при взаємодії оптичного випромінювання з молекулярними структурами пептидів.

18. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Мержвинський П.А., Дегтярук В.І., Риженко Т.М., Тимошенко Я.М., Грищенко Л.В., Расчектаева А.І., Тимофеев Є.П. Забезпечення єдності вимірювань в біомедичних оптичних приладах. *Метрологія та прилади. 2017. № 1. С. 25–36. (Index Copernicus).*

Здобувачем досліджені можливості забезпечення єдності вимірювань в біомедичних оптичних приладах.

19. Ходаковський М.І., Будник М.М., Лебедева Т.С., Шпильовий П.Б., Риженко Т.М., Мудренко М.І., Тимошенко Я.М. Розроблення метрологічного забезпечення рефрактометричних вимірювань на основі поверхневого плазмонного резонансу. *Метрологія та прилади. 2017. № 5 (67). С. 25–31. (Index Copernicus).*

Здобувачем запропонована методика рефрактометричних вимірювань на основі поверхневого плазмонного резонансу згідно технологічного регламенту метрологічних випробовувань.

20. Золотопуп А.И., Яворский И.А., Ходаковский Н.И., Климентович В.А. Моделирование процесса формирования наноструктур в проводящих пленках с помощью тунельного сканирующего микроскопа. *Зб. наук. праць Інституту*

кібернетики імені В.М.Глушкова НАН України. *Перспективні засоби обчислювальної техніки та інформатики*. К. 1999. С. 61–68.

Здобувачем проведено моделювання та експериментальні дослідження процесів формування наноструктур за допомогою скануючого тунельного мікроскопа.

21. Ходаковский Н.И. Использование молекулярной памяти для сверхплотной записи информации в запоминающих устройствах вычислительной техники. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Нові комп'ютерні засоби, обчислювальні машини та мережі*. 2001. т.1. С. 36–41.
 22. Ходаковский Н.И. Этапы развития технологических подходов к созданию молекулярной элементной базы для вычислительной техники. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Засоби комп'ютерної техніки з віртуальними функціями і нові інформаційні технології*. К. 2002. Т. 1. С. 4–9.
 23. Ходаковский Н.И. Исследование процессов изготовления элементов молекулярных сенсорных устройств. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2003. Т. 2. С. 134–138.
 24. Ходаковский Н.И., Кравченко В.П., Шут Н.И. Разработка обучающей компьютерной системы на основе использования эффекта молекулярной памяти для подготовки авиадиспетчеров. Зб. наук. праць Державної льотної академії України. Кіровоград. 2004. Вип. 9. С. 63–71.
- Здобувачем запропоновані підходи до розробки навчаючої комп'ютерної системи на основі ефекту молекулярної пам'яті в умовах екстремальної оцінки ситуації.*
25. Ходаковский Н.И. Исследование принципов создания обучающих компьютерных систем на основе эффекта молекулярной памяти и специальных экспертных систем. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2004. № 3. С. 111–116.
 26. Ходаковский М.І. Використання елементів інформаційних нанотехнологій молекулярних структур пам'яті підсистем природного інтелекту в комп'ютерних навчаючих системах. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2006. № 5. С. 125–132.
 27. Ходаковский Н.И. Исследование информационных нанотехнологий обработки информации для построения систем на основе знаний. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2008. № 7. С. 23–31.
 28. Войтович И.Д., Золот А.И., Ходаковский Н.И. Основные принципы моделирования, проектирования и изготовления медицинских нанороботов. *Математичні машини та системи*. 2009. № 4. С. 147–160.

Здобувачем вивчені можливості моделювання та розробки медичних нанороботів.

29. Ходаковский Н.И., Ларкин С.Ю., Галстян Г.Г. Исследование зондовых методов получения элементов наноэлектронных приборов и технологии диагностики с использованием электростатической силовой микроскопии. Сб. науч. тр. Ин-та металлофизики им. Г.В. Курдюмова НАН Украины. *Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии*. 2011. Т. 9. Вып. 3. С. 535–542.
Здобувачем експериментально досліджено та запропоновано застосування зондових методів формування елементів наноелектронних пристроїв.
30. Ходаковский Н.И. Исследование процессов молекулярного кодирования нейронных сетей при обучении. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2011. № 10. С. 30–39.
31. Ходаковский Н.И. Исследование синаптических систем молекулярной памяти и их микропроцессорных свойств при обучении. Зб. наук. праць Інституту кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2012. № 11. С. 23–32.
32. Ходаковский Н.И., Золот А.И., Мерзвинский П.А. Исследование внешних сигналов макромолекулярного матрикса рефлексно-сенсорных модулей человека магнито- и электрометрическими методами. Зб. наук. пр. Ін-ту металлофизики ім. Г.В. Курдюмова НАН України. 2013. Т. 11, № 4. С. 701–710.
Здобувачем запропонована та досліджена методика вимірювань Електричних та магнітних полів в рефлексно-сенсорних ділянках організму людини.
33. Ходаковский Н.И., Осинский В.И. Исследование процессов приобретения знаний при формировании памяти под контролем ядра нейрона. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2015. № 14. С. 24–31.
Здобувачем вивчено процеси формування запам'ятовуючих структур під контролем ядра нейрона біосистем для апаратної реалізації запам'ятовуючих пристроїв на основі використання наноструктур.
34. Ходаковский Н.И., Осинский В.И. Исследование процессов записи информации на ДНК-комплексах нейрона. Зб. наук. праць Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. К. 2016. № 15. С. 86–93.
Здобувачем запропоновано моделі та проведені дослідження процесів запису інформації на ДНК-комплексах нейрона біосистем з метою створення запам'ятовуючих нанопристроїв.
35. Ходаковский Н.И. Исследование процессов работы молекулярных устройств при формировании памяти в ядре нейрона. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2017. С. 118–125.
36. Ходаковський М.І., Вербицький В.Г. Дослідження процесів зберігання інформації в генних комплексах нейронів. *Комп'ютерні засоби, мережі та системи*. 2018. № 17. С. 60–66.

Здобувачем вивчено та досліджено процеси зберігання інформації в генних комплексах нейронів біосистем для створення запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації.

37. Патент України на винахід UA 77015. Пристрій для контролю формування нанорозмірних структур. Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А., Шкляр М.П. Опубл. в бюл. № 10, 2006.

Здобувачем проведено патентний пошук, вибрано прототип та описано роботу пристрою.

38. Патент України на винахід UA 80154. Пристрій для виготовлення наноструктур. Золотопуп А.І., Ходаковський М.І., Ларкін С.Ю., Коржинський Ф.Й., Мержвинський П.А. Опубл. в бюл. № 13, 2007.

Здобувачем вибрано прототип та описано роботу пристрою.

39. Патент України на винахід UA № 39552. H01 L21/00. Пристрій для виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил. Ходаковський М.І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Воронько А.О. Опубл. 25.02.2009, бюл. № 4.

Здобувачем проведені експериментальні дослідження виготовлення еталонних структур на основі атомно-силової мікроскопії електростатичних сил.

40. Золот А.І., Ходаковський М.І., Мержвинський П.А. Пристрій формування наноелектронних структур. Патент України на корисну модель № 58422. Бюл. „Промислова власність” № 7 від 11.04.2011 р.

Здобувачем вибрано протитип та запропоновано формулу корисної моделі.

41. Ходаковський М.І., Золот А.І., Ларкін С.Ю., Новіков Є.І., Галстян Г.Г. Пристрій зондового анодного окислення наноструктур. Патент України на корисну модель № 62412. Бюл. „Промислова власність” № 16, 2011 р.

Здобувачем виконані дослідження процесів зондового анодного окислення наноструктур та запропонована формула корисної моделі.

42. Ходаковський М.І. Запам'ятовуючий пристрій з надвисокою щільністю запису інформації. Патент України на корисну модель № 124147. Бюл. „Промислова власність” № 6. 2018 р., опубл. 26.03.2018 р.

43. Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуюча матриця на основі мемристорних наноелектронних структур. Патент України на корисну модель № 125453. Бюл. „Промислова власність” № 9. 2018 р., опубл. 10.05.2018 р.

Здобувачем проведені дослідження роботи запам'ятовуючої матриці на основі мемристорних наноелектронних структур та описано роботу пристрою.

44. Ходаковський М.І., Мудренко М.І. Запам'ятовуючий пристрій на основі оптичної нанопам'яті. Патент України на корисну модель № 127517. Бюл. „Промислова власність” №15. 2018. Опубл. 10.08.2018 р.

Здобувачем виконані дослідження з вибору параметрів оптичної нанопам'яті для пристрою та описано його роботу.

45. Палагін О.В., Осінський В.І., Золотопуп А.І., Мержвинський А.О., Ходаковсь-

кий М.І., Осінський О.В. Від гетеролазера до квантового комп'ютера. Праці міжнародного симпозіуму з питань створення перших ЕОМ „Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”. К. 1998. С. 437 – 450.

Здобувачем запропоновані підходи до використання технологій створення гетеролазерних структур при розробці концепції побудови квантового комп'ютера.

46. Ходаковський М.І., Золотопуп А.І. Сверхплотная запись информации на основе молекулярных носителей для памяти перспективных ЭВМ. Праці міжнародного симпозіуму з питань створення перших ЕОМ „Комп'ютери у Європі: минуле, сучасне і майбутнє”. К. 1998. С. 271–273.

Здобувачем проведені дослідження надциліного запису інформації з використанням молекулярних носіїв пам'яті.

47. Voitovych I.D., Khodakovskiy N.I. Bionic approach to the processes of functioning and planning of the element base of nanorobots. Ukrainian-German Symposium on Physics and Chemistry of Nanostructures and on Nanobiotechnology- Beregove, Crimea, Ukraine. 6–10 September. 2010. P. 91.

Здобувачем проведено аналіз роботи біонанороботів у складі систем організму людини з метою створення нанороботів для медичних застосувань.

48. Voitovych I.D., Zolot A.I., Khodakovskii N.I., Merjvinskii A.A., Merjvinskii P.A. Controlling the properties of nanostructure for creation nanodevices with reproducible characteristics. XXXI International Scientific Conference „Electronics and Nanotechnology”. Kyiv, Ukraine, 12 –14 april, 2011. P. 45.

Здобувачем запропоновано метод керування процесом формування наноструктур для побудови наноприладів.

49. Khodakovskiy M.I., Budnyk M.M., Orel V.E., Budnyk V.M. Voitovych I.D. Experimental studying magnetic nanocomplexes with doxorubicin for drug delivery and cancer therapy. Materials of the Mediterranean-East-Europe Meeting „Multi-functional nanomaterials (NanoEuroMed 2011)”. Uzhgorod, 2011. P.192 –193.

Здобувачем вивчені можливості використання наноструктур для діагностичних цілей в терапії онкозахворювань.

50. Zolot A.I., Khodakovskyy M.I., Merjvinskyu P.A. Using of local anodic oxidation in the system substrate-tip of the probe of atomic force lithographer for the creation of storage nanodevices. Proceedings of the XXXII international scientific conference ELNANO. „Electronics and Nanotechnology”. Kyiv, Ukraine, 10–12 april, 2012. P. 27–28.

Здобувачем виконані експериментальні дослідження процесів локального анодного окислення при створенні запам'ятовуючих наноприладів.

51. Ходаковський М.І. Розробка запам'ятовуючих пристроїв з надвисокою щільністю запису інформації. Тези доповіді міжнародної конференції, присвяченої 60- річчю Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. 11–13 грудня 2017р. С. 235–237.

АНОТАЦІЯ

Ходаковський М.І. Методи та моделі побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням нано- і молекулярних технологій. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.27.01 – твердотільна електроніка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського, Київ, 2019.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню науково-прикладної проблеми побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням нано- і молекулярних технологій шляхом розробки нового класу запам'ятовуючих пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації на основі методів та моделей нових та вдосконалених існуючих методів твердотільної електроніки. Розроблено методи побудови запам'ятовуючих пристроїв з використанням скануючої тунельної літографії, локального зондового окислення із застосування атомно-силової літографії, технологій створення мемристорних нанoeлектронних структур та на основі запису інформації на молекулярні носії, зокрема пептидні структури та структури молекулярної електроніки з використанням нуклеїнових кислот.

Розроблені методи, моделі та методики розробки запам'ятовуючих елементів та пристроїв із надвисокою щільністю запису інформації можуть бути використані при відпрацюванні технологічних процесів по їх виготовленню. Нові наукові та технологічні рішення забезпечують збільшення щільності запису інформації на 1–2 порядки при створенні запам'ятовуючих структур та пристроїв на їх основі.

Ключові слова: запам'ятовуючі пристрої із надвисокою щільністю запису інформації, нанотехнології, молекулярні технології, мемристорні нанoeлектронні структури, оптична нанопамять, запис інформації на полімерні органічні носії.

АННОТАЦИЯ

Ходаковский Н.И. Методы и модели построения запоминающих устройств с использованием нано- и молекулярных технологий. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.27.01 – твердотельная электроника. – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского, Киев, 2019.

Диссертация посвящена решению научно-прикладной проблемы построения запоминающих устройств с использованием нано- и молекулярных технологий путем разработки нового класса запоминающих устройств с сверхвысокой плотностью записи информации на основе методов и моделей новых и усовершенствовании существующих методов твердотельной электроники с применением сканирующей туннельной литографии, локального анодного окисления, технологий создания мемристорных нанoeлектронных структур и на основе записи информации на молекулярные носители, в частности пептидные

структуры и структуры молекулярной электроники с использованием нуклеиновых кислот.

Разработаны теоретические основы построения запоминающих устройств с сверхвысокой плотностью записи информации на основе методов твердотельной электроники, представленных в виде методик, моделей, методов и технологических процессов. Разработанные методы, модели и методики разработки запоминающих элементов и устройств с сверхвысокой плотностью записи информации могут быть использованы при отработке технологических процессов по изготовлению указанных элементов и устройств.

Разработана технология и усовершенствованы методы расчетов режимов оборудования при изготовлении наноструктур, которые дают возможность разрабатывать и изготавливать основные элементы для запоминающих устройств, в частности для наномедицины, а именно для наносенсоров, молекулярных сенсоров и нанороботов.

Предложенный метод создания памяти со сверхвысокой плотностью записи информации на основе использования запоминающих матриц мемристорных наноэлектронных структур, сопротивление которых изменяется при проведении записи и стирания информации и могут быть использованы в создании нейрона, когда предыстория функционирования мемристорной наноструктуры определяет ее ответную реакцию.

Предложенный метод создания запоминающих устройств со сверхвысокой плотностью записи информации с применением оптической молекулярной нанопамати на основе органической молекулярной запоминающей среды и молекулярной инженерии фотопереклюкающих молекулярных устройств. Реализовано высокую устойчивость носителя информации для записывающего слоя и для раствора, используемого при изготовлении записывающего слоя, а также обеспечивается необходимая величина фотоиндуцированного изменения показателя преломления фотохромных соединений для надежного неdestructивного считывания оптической информации.

Разработан метод создания запоминающих структур и устройств со сверхвысокой плотностью записи информации с применением принципов обработки информации в наноэлектронных и молекулярных системах нейронов и их ядерных компонентах. Разработчики нанотехнологических систем могут использовать сложные процессы обработки информации в биосистемах для создания новых технологий в молекулярной электронике и нанотехнологиях. Анализ информационных процессов в живой клетке дает возможность быстро находить новые технические решения, пользуясь уже созданными природой рецептами и компонентами.

Ключевые слова: запоминающие устройства с сверхвысокой плотностью записи информации, нанотехнологии, молекулярные технологии, мемристорные наноэлектронные структуры, оптическая нанопамать, запись информации на полимерные органические носители.

ABSTRACT

Khodakovskiy M.I. Methods and models of constructing memory devices using nano- and molecular technologies. – As a manuscript.

Doctoral thesis of technical sciences on specialty 05.27.01 – solid state electronics. – National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute, Kyiv, 2019.

The dissertation is devoted to solving the scientific and applied problem of constructing storage devices using nanoscale and molecular technologies by developing a new class of storage devices with super-high density of recording of information based on methods and models of new and improved existing methods of solid state electronics. Methods of constructing storage devices using scanning tunneling lithography, local probe oxidation using atomic force lithography, technologies for the creation of memristor nanoelectronic structures and the recording of information on molecular carriers, in particular peptide structures and structures of molecular electronics using nucleic acids, have been developed.

The developed methods, models and methods for developing memory and ultra-high density recording devices can be used to process technological processes for their production. New scientific and technological solutions provide an increase in the recording density of 1–2 orders of magnitude when creating memory structures and devices based on them.

Key words: storage devices with ultrahigh density recording information, nanotechnology, molecular technologies, memristor nanoelectronic structures, optical nanomemory, recording of information on polymeric organic carriers.

Підп. до друку 02.07.2019. Формат 60х84/ 16. Папір офсетний.
Друк цифровий. Ум. друк. арк. 2.79. Обл.- вид. арк. 3,0.
Зам. № 53. Тираж 100 пр.

Редакційно-видавничий відділ

Інституту кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України
03187, Київ -187, проспект Академіка Глушкова, 40